

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**Détermination des sous-populations
du stock de morue du nord du
golfe du Saint-Laurent
à l'aide de la chimie des écailles et des vertèbres**

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Comme exigence partielle de la

Maîtrise ès Sciences (M. Sc.) en Océanographie

par

OPHELIE SAGNOL

Août 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Merci à Jean-Claude Brêthes, mon directeur de recherche, pour ses remarques pertinentes qui ont permis d'approfondir et d'enrichir ce projet de recherche, ainsi que pour ses précieuses corrections.

Merci à Claude Belzile, pour sa grande disponibilité, ses conseils et aussi pour son intérêt pour ce travail.

Merci à André Rochon, de présider mon jury. Merci à Steve Campana d'accepter de juger mon travail.

Un grand Merci à Alain Fréchet, mon codirecteur, aux pêcheurs, et à l'équipage du Téléost (saison 2006), qui ont fait un travail remarquable. Merci à Johanne Gauthier, Philippe Schwab et à Maureen Organ pour leur collaboration.

Merci à Hacène Tembrari, d'avoir partagé l'espace d'un mois mon aventure dissection de morues.

Enfin merci à ma famille et mes amis pour leurs encouragements et un clin d'œil tout particulier à Onix, sans qui l'aventure n'aurait jamais commencé.

RÉSUMÉ

Des études sur le stock de morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*) du nord du golfe du Saint-Laurent (3Pn4RS), basées sur des données de marquages suggèrent depuis longtemps la présence de sous-populations au sein de ce stock. Si les morues du nord du golfe du Saint-Laurent évoluent dans des milieux différents durant leur période de fraie alors la composition chimique de leurs structures calcifiées pourrait servir de marqueur naturel et être utilisée pour discriminer les sous-populations de ce stock. Dans le but de vérifier cette hypothèse, des individus de différents sites du nord du golfe du Saint-Laurent ont été échantillonnés durant l'été 2006 ainsi que des individus du sud du golfe (4T). Un échantillonnage supplémentaire en automne 2006 a procuré des individus du sud de Terre-Neuve (3Pn) pour vérifier la possibilité de homing durant l'hiver. Un microscope électronique à balayage muni d'un système à énergie dispersive (SEM-ED) a été utilisé pour quantifier les signatures d'éléments chimiques dans les structures calcifiées (écailles et vertèbres) de 718 morues. L'analyse de l'empreinte chimique des écailles fondée sur un modèle comportant six éléments chimiques (Mg, P, Na, S, CL et K) a permis de discriminer trois sous-populations au sein du stock du nord du golfe: les individus du secteur d'Anticosti, du nord-est du golfe et une sous-population au sud-ouest de Terre-Neuve. L'utilisation de la chimie des vertèbres ne permet pas de discriminer les sous-populations de façon satisfaisante, seule la composante de la zone géographique de l'île d'Anticosti ressort de l'étude des vertèbres. Durant la période hivernale, tous les individus du nord du golfe du Saint-Laurent se rassemblent dans une zone commune au sud de Terre-Neuve (3Pn), en dehors apparemment de la composante de l'île d'Anticosti. La présence de mélanges entre les

composantes du stock déjà mentionnés dans la littérature semble se confirmer ici, avec principalement des mélanges entre les populations du nord-est du golfe et du sud-ouest de Terre-Neuve, mais aussi un mélange important avec les individus de 3Ps et 3Pn automne. Les individus du sud du golfe du Saint-Laurent (4T) possèdent une empreinte chimique différente des individus du nord du golfe confirmant la discrimination entre les deux stocks 3Pn4RS et 4T4Vn. L'élément essentiel qui ressort de l'étude c'est l'importante discrimination de la composante d'Anticosti, composante qui semblait avoir disparu d'après des études antérieures.

Dans des études futures, il serait intéressant de connaître l'impact de l'environnement sur la chimie de ces structures calcifiées. Tout ceci dans un but de mieux appréhender la structure de ce stock en vue d'améliorer la gestion du stock du nord du golfe du Saint-Laurent, en prenant en compte dans la gestion l'impact important des mélanges entre les composantes comme cela a été mis en place pour la zone de 3Ps.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	II
RÉSUMÉ.....	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
INTRODUCTION.....	1
1. Contexte général.....	1
2. Morue de l'Atlantique Nord.....	2
3. La morue du nord du golfe du Saint-Laurent.....	4
4. Composition chimique des structures calcifiées	5
4.1. Les écailles	8
4.2. Les vertèbres	12
5. Objectifs de l'étude	13
CHAPITRE 1 - MATÉRIEL ET MÉTHODES	15
1. Échantillonnage.....	15
2. Préparation des échantillons.....	19
3. Analyse des éléments chimiques.....	20
4. Analyses statistiques	28
CHAPITRE 2 - RÉSULTATS CONCERNANT LES ÉCAILLES	31

1.	Discrimination des composantes du stock de morue du nord du golfe du Saint-Laurent....	31
1.1.	Empreinte chimique des écailles	31
1.2.	Analyse des zones du nord du golfe du Saint-Laurent (échantillonnage d'été, régions A, B et C)	35
1.3.	Analyse des individus du nord du golfe du Saint-Laurent et du sud de Terre-Neuve (échantillonnages d'été et d'automne)	40
1.4.	Analyse de la composante A (Anticosti) avec le sud-ouest de Terre-Neuve (échantillonnages d'été et d'automne)	46
1.5.	Discrimination entre les zones du nord et du sud du golfe du Saint-Laurent (échantillonnage d'été, régions A, B, C et 4T).....	49
1.6.	Analyse des individus du nord et du sud du golfe du Saint-Laurent et les individus du sud de Terre-Neuve (échantillonnages d'été et d'automne)	53
CHAPITRE 3 - RÉSULTATS CONCERNANT LES VERTÈBRES		56
1.	Discrimination des composantes du stock de morue du nord du golfe du Saint-Laurent à l'aide de la chimie des vertèbres	56
1.1.	Empreinte chimique des vertèbres	56
1.2.	Discrimination des zones du nord du golfe du Saint-Laurent (échantillonnage d'été, régions A, B et C)	58
1.3.	Analyse des individus du golfe du Saint-Laurent et du sud de Terre-Neuve (échantillonnages d'été et d'automne)	62
1.4.	Analyse de la particularité de la composante A (Anticosti).....	66
2.	Corrélation entre la chimie des écailles et des vertèbres.....	70
DISCUSSION		71
CONCLUSION		81
RÉFÉRENCES.....		83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Résumé des données concernant les morues échantillonnées durant la saison 2006..	18
Tableau 2.	Moyennes et écarts-types des concentrations des éléments chimiques détectés dans le nucleus des écailles de morues (<i>Gadus morhua</i>). Les concentrations sont données en pourcentage de poids \pm écart type.	33
Tableau 3.	Résultats de l'ANCOVA à un facteur (taille) avec les éléments chimiques comme variables dépendantes (n = 718).....	35
Tableau 4.	Analyse de variance à sept facteurs sans répétition comparant l'influence des éléments chimiques (variables standardisées avec la taille) par rapport aux trois zones principales de l'étude (A, B, C) (n = 565).....	36
Tableau 5.	Résultats de la classification Jackknifed des individus prélevés en été en fonction des zones (n = 565) selon l'analyse discriminante. Les données indiquent l'exactitude de classification basée sur les éléments chimiques Mg, P, S, K, Cl et Na identifiés dans les écailles de morues.	39
Tableau 6.	Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed).	42
Tableau 7.	Résultats de la classification Jackknifed des individus prélevés en été et en automne en fonction des zones A, 3Pn automne et 3Ps (n = 240) selon l'analyse discriminante. Les données indiquent l'exactitude de classification basée sur les éléments chimiques Ca, Mg, P, S, K, Cl et Na identifiés dans les écailles de morues.	47
Tableau 8.	Analyse de variance à sept facteurs sans répétition comparant l'influence des éléments chimiques (variables standardisées avec la taille) par rapport aux trois zones principales de l'étude et la région du sud du golfe (A, B, C et 4T) (n = 583).	49
Tableau 9.	Résultats de la classification Jackknifed des individus prélevés en été en fonction des zones (n = 583) selon l'analyse discriminante. Les données indiquent l'exactitude de classification basée sur les éléments chimiques Mg, P, S, K, Cl et Na identifiés dans les écailles de morues.	51
Tableau 10.	Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed).	54
Tableau 11.	Moyennes et écarts-types des concentrations des éléments chimiques présents dans les vertèbres de morues (<i>Gadus morhua</i>). Les concentrations sont données en pourcentage de poids \pm écart type.	57
Tableau 12.	Résultats de l'ANCOVA à un facteur (taille) avec les éléments chimiques comme variables dépendantes (n = 700).....	58

Tableau 13. Analyse de variance à cinq facteurs sans répétition comparant l'influence des éléments chimiques par rapport aux trois zones principales de l'étude (n = 567).	59
Tableau 14. Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed). Les données indiquent l'exactitude de classification basée sur les éléments chimiques Mg, Na, Ca et P identifiés dans les vertèbres de morues.	60
Tableau 15. Analyse de variance comparant l'influence des éléments chimiques par rapport aux zones d'études (n = 700).	63
Tableau 16. Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed).	64
Tableau 17. Analyse de variance comparant l'influence des éléments chimiques par rapport à la composante A et les zones du sud de Terre-Neuve.	66
Tableau 18. Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed).	68

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1. Carte de la zone d'étude montrant les sites d'échantillonnages durant la saison 2006. Les cercles sont proportionnels à l'effort d'échantillonnage et les ellipses représentent les trois principales composantes du nord du golfe du Saint-Laurent décrites par Yvelin *et al.* (2005). 17
- Fig. 2. Schéma illustrant l'ensemble des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon (matériaux.ecam.fr :savoirplus/meb/meb.html). 21
- Fig. 3. Schéma descriptif du SEM-ED (matériaux.ecam.fr/savoirplus/meb/principes.html). 22
- Fig. 4. Images en microscopie électronique à balayage avec un voltage de 20keV, a) d'une vertèbre et b) d'une écaille de morues. La flèche rouge représente la zone d'analyse à l'aide du système à énergie dispersive. 25
- Fig. 5. Spectres obtenus à l'aide du SEM-ED au niveau du nucléus des écailles de morue des six régions du golfe du Saint-Laurent. (C : Carbone, Ca : Calcium, Cl : Chlore, F : Fluor, K : Potassium, Mg : Magnésium, N : Azote, Na : Sodium, O : Oxygène, P : Phosphore, S : Soufre, Sr : Strontium). 26
- Fig. 6. Spectres obtenus à l'aide du SEM-ED au niveau des vertèbres de morues des cinq régions du golfe du Saint-Laurent. (Al : Aluminium, C : Carbone, Ca : Calcium, Cl : Chlore, F : Fluor, K : Potassium, Mg : Magnésium, N : Azote, Na : Sodium, O : Oxygène, P : Phosphore, S : Soufre). 27
- Fig. 7. Taille des morues à la capture pour les cinq zones de l'étude. 34
- Fig. 8. Résultats de l'analyse discriminante canonique pour caractériser les différences d'empreintes chimiques (variables standardisées avec la taille) des écailles de morues du nord du golfe du Saint-Laurent entre les échantillons d'Anticosti (+ , A), des individus du nord-est du golfe du Saint-Laurent (× , B) et ceux du sud-ouest de Terre-Neuve (○ , C). Les lignes délimitent de manière visuelle les trois zones. 38
- Fig. 9. Empreinte chimique des écailles (variables standardisées avec la taille) de morues appartenant au stock du nord du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante. Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75 %. Des échantillons venant de la région d'Anticosti (A, ▽), région du nord-est du golfe (B, △), de la région du sud-ouest de Terre-Neuve (C, +), 3Ps (×) et un échantillonnage en 3Pn ayant eu lieu en automne (○). 43
- Fig. 10. Empreinte chimique des écailles (variables standardisées avec la taille) de morues appartenant au stock du nord du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse

canonique discriminante. Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75%. Des échantillons venant de la région d'Anticosti (A, ▽), région du nord-est du golfe (B, △), de la région du sud-ouest de Terre-Neuve (C, +), 3Ps (×) avec ajout de l'échantillonnage en 3Pn aut juste tracé par-dessus l'analyse ().45

- Fig. 11. Résultats de l'analyse discriminante canonique utilisée pour caractériser les différences d'empreintes chimiques (variables standardisées avec la taille) des écailles de morues du stock du nord du golfe du Saint-Laurent entre les échantillons de la région A du golfe (Anticosti, +), de 3Pn automne (○) et de 3Ps (×).48
- Fig. 12. Empreinte chimique des écailles (variables standardisées avec la taille) de morues appartenant au stock du nord du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante. Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75 %. Des échantillons venant de la région A (△), région B (×), de la région C (○) et un échantillonnage dans le stock du sud du golfe du Saint-Laurent en 4T (+).52
- Fig. 13. Empreinte chimique des écailles (variables standardisées avec la taille) de morues appartenant au stock du nord et du sud du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante. Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75 %. Des échantillons venant de la région A (△), région B (△), de la région C (+), 3Ps (×), 3Pn ayant eu lieu en automne (○) et un échantillonnage dans le stock du sud du golfe du Saint-Laurent en 4T (▽).55
- Fig. 14. Résultats de l'analyse discriminante canonique pour caractériser les différences d'empreintes chimiques des vertèbres (variables standardisées avec la taille) de morues du nord du golfe du Saint-Laurent entre les échantillons du site A (Anticosti +), des individus du site B (nord-est du golfe ×).61
- Fig. 15. Empreinte chimique des vertèbres de morues du stock du nord du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante (variables standardisées avec la taille). Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75 %. Sites d'échantillonnage : A (▽), B (△), C (+), 3Ps (×) et 3Pn automne (◊).65
- Fig. 16. Résultats de l'analyse discriminante canonique utilisée pour caractériser les différences d'empreintes chimiques des vertèbres (variables standardisées avec la taille) de morues du stock du nord du golfe du Saint-Laurent entre les échantillons du site A (+), des individus de 3Pn automne (◊) et ceux de 3Ps (×).69

INTRODUCTION

1. Contexte général

Les stratégies de pêche mises en place visent des unités de stocks supposées correspondre à des populations uniques. L'effort de pêche se répartit donc sur l'ensemble des individus d'un stock sans distinction (Stephenson, 1997). Ce type de gestion, considérant qu'une unité de stock est déterminée par une zone de nursery unique, explique probablement la disparition de certaines zones de fraie au sein de populations exploitées commercialement (Stephenson, 1997), puisqu'une pêche effectuée sur un mélange de sous-populations peut causer la disparition de certaines d'entre elles (Frank et Brickman, 2000). La structure des populations de poisson est certainement beaucoup plus complexe. Ceci explique la nécessité de définir la structure précise des stocks d'espèces exploitées en vue de limiter une surexploitation de certaines composantes du stock (Stephenson, 1998). La définition précise de la structure des populations exploitées est un problème important pour la gestion des pêches. La présence de composantes distinctes au sein d'un stock n'a été prise en considération que récemment dans les objectifs de conservation (Stephenson, 1999).

Plusieurs facteurs viennent compliquer la définition d'un stock, comme la présence de migrations différentes, l'existence de mélanges plus ou moins importants entre plusieurs composantes d'un même stock ou avec des individus d'un stock adjacent et aussi l'existence de populations discrètes au sein d'une unité de gestion (Stephenson, 1998).

Des études cherchant à déterminer la présence de sous-population au sein des stocks apportent des informations essentielles pour développer des stratégies de conservation. La connaissance des sous-populations exploitées par une pêcherie permet une meilleure gestion et d'éviter la disparition de ces sous-populations.

2. Morue de l'Atlantique Nord

La Morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*) a longtemps été la principale espèce commerciale du nord-ouest de l'Atlantique. Au cours des dernières décennies, la pression de pêche, associée à une surévaluation de la biomasse et à des années de faible recrutement, a causé l'effondrement de la majorité des stocks canadiens (Myers *et al.*, 1996). Selon les stocks, la biomasse des reproducteurs a diminué de 77 à 99% par rapport aux maximums historiques (Myers *et al.*, 1997b) et les biologistes estiment que des composantes reproductrices pourraient avoir disparu (Smedbol *et al.*, 2002).

Cette chute brutale des stocks dans les années 1990 (Cohen *et al.*, 1990), a entraîné la mise en place d'une série de moratoires sur la pêche dirigée à partir de 1992. Toutefois, contrairement aux prédictions, la reconstitution des stocks ne s'est pas effectuée (Myers *et al.*, 1997a). En raison de l'importance économique et historique de l'espèce, la morue a été l'objet de nombreuses études scientifiques. Les biologistes ont été conduits à reconsidérer leur démarche, observant les limites des moratoires et s'interrogeant sur les bases scientifiques de la gestion. La définition des unités de stock utilisée dans les règles de gestion est particulièrement remise en question.

Plusieurs populations de morue relativement isolées les unes des autres ont été décrites au niveau de l'Atlantique Nord (Templeman, 1974) et elles se différencient par leurs aires de pontes et la présence de caractéristiques morphologiques marquées. On a ainsi neuf unités de gestion, considérées comme des stocks, dans l'Atlantique canadien et l'existence de sous-populations est soupçonnée depuis longtemps.

La plupart des études sur la structure des stocks de morues ont été réalisées sur les populations de l'est de Terre-Neuve et au large de la Nouvelle-Écosse (Ruzzante *et al.*, 1999). Templeman (1962, 1979) indique que le stock des Grands Bancs de Terre-Neuve (région 2J3KL de l'OPANO) est constitué de plusieurs composantes se mélangeant durant certaines saisons. Beacham *et al.* (2002) ont examiné la variation des microsatellites de l'ADN au niveau des morues des divisions 2J et 3KL de l'Atlantique nord-ouest. Leur étude a permis de montrer une différence génétique significative à l'intérieur de ces régions et elle a permis de définir la présence de plusieurs sous-populations, confirmant les résultats de Ruzzante *et al.* (1999). Bentzen *et al.* (1996), à l'aide de l'analyse des microsatellites, ont détecté des différences génétiques qui montrent la présence de quatre sous-populations dans la région de Hamilton-Belle-Isle (nord-est de Terre-Neuve). Sur la base de ces résultats, Smedbol et Wroblewski (2002) ont proposé l'existence d'une métapopulation sur les Grands Bancs de Terre-Neuve.

3. La morue du nord du golfe du Saint-Laurent

Dans le golfe du Saint-Laurent, il existe deux unités de stocks. Une population est localisée dans le sud du golfe (unité 4T4Vn (novembre-avril)). La deuxième occupe la région nord (unité 3Pn, 4RS). Ces deux populations sont séparées par le chenal Laurentien.

La morue du nord du golfe du Saint-Laurent a connu le même effondrement que les autres stocks de l'Atlantique canadien, puisque la biomasse génitrice est passée de 378 000 t en 1983 à 44 000 t au début de 2007. On observe également une contraction de la distribution géographique puisque la morue se concentre actuellement essentiellement le long de la côte ouest de Terre-Neuve et elle est devenue rare dans les secteurs nord et ouest de l'île d'Anticosti. Ces problèmes liés à l'effondrement des stocks démontrent la nécessité de déterminer la structure précise du stock des morues du nord du golfe afin de protéger sa diversité génétique et de favoriser la conservation des différentes zones de nurserys.

Durant l'hiver, les morues du stock du nord du golfe se rassemblent au niveau du sud-ouest de Terre-Neuve (3Pn, 3Ps). Au début du printemps, les morues migrent vers le nord du golfe du Saint-Laurent, migration attribuée à la présence d'eaux plus chaudes et de nourriture abondante (Templeman, 1979). La période de fraie a lieu en avril et mai, au début de la migration estivale. En été, les individus se retrouvent près des côtes à de faibles profondeurs (0-50m). Les individus se dispersent alors dans différentes aires entre la côte ouest de Terre-Neuve et la Moyenne et Basse Côte-Nord du Québec, ce qui implique l'existence de différents patrons migratoires. À l'automne, une migration de retour ramène les individus vers le sud-ouest de

Terre-Neuve, possiblement pour éviter la formation de la glace dans le golfe (Templeman, 1979, Fréchet, 1990).

La structure de la population du stock de morues du nord du golfe du Saint Laurent n'est pas encore bien définie. Plusieurs travaux, fondés sur des marquages, suggèrent la présence de sous-populations (Minet 1976; Templeman 1979; Gascon *et al.*, 1990; Yvelin *et al.*, 2005), présentant un comportement de homing en été et en hiver (Minet, 1976; Templeman, 1979; Gascon *et al.*, 1997). Yvelin *et al.* (2005) en suggèrent au moins quatre : ouest Terre-Neuve, nord-ouest Terre-Neuve, Basse Côte-Nord du Québec, et région d'Anticosti. Cette dernière composante pourrait avoir disparu depuis les années 1980. Templeman (1979) et Yvelin *et al.* (2005) signalent aussi que certains individus en 3Pn n'effectueraient aucune migration. Les individus de ce stock peuvent aussi se mélanger avec les unités voisines, 3K au nord dans le détroit de Belle-île et 3Ps au sud de Terre-neuve (Gascon *et al.*, 1990).

Les données de marquages s'avèrent toutefois insuffisantes pour affirmer que les différences observées dans les parcours migratoires correspondent effectivement à des sous-populations. Des analyses supplémentaires sont nécessaires pour déterminer la présence de sous-populations.

4. Composition chimique des structures calcifiées

Des travaux ont cherché à déterminer la structure des stocks de morue à l'aide de la structure génétique (par ex., Ruzzante *et al.*, 1999; Bentzen *et al.*, 1996), mais d'autres techniques

sont aussi mises en avant pour déterminer la présence de sous-populations. Des études ont démontré la possibilité que l'analyse quantitative des éléments traces retrouvés dans les structures calcifiées des poissons (otolithes, écailles et vertèbres) pouvait fournir des informations sur la structure même des populations et sur leurs migrations (Fisheries Agency of Japan, 1967). Les structures calcifiées des téléostéens sont composées d'une matrice en carbonate de calcium ou carbonate de phosphate, dans lesquels est incorporé un grand nombre d'éléments chimiques tout au long de la vie du poisson (Carlström, 1963; Degens *et al.*, 1969). Les éléments traces conservés dans les structures calcifiées présentent un potentiel important pour la discrimination des stocks (Gillanders, 2001).

Cette approche centrée sur les pièces calcifiées se fonde sur l'hypothèse que la composition chimique de ces structures reflète les caractéristiques physico-chimiques de l'environnement au sein duquel les individus ont évolué (Campana, 1999). Ceci a comme conséquence que la composition chimique des écailles, otolithes et vertèbres reflète la composition de l'eau dans lequel le poisson a résidé (Bagenal *et al.*, 1973 ; Moreau et Barbeau, 1979 ; Lapi et Mulligan, 1981 ; Belanger *et al.*, 1987). L'application principale ayant guidé la plupart des développements de la microchimie des structures calcifiées concerne la discrimination des stocks. La structure calcifiée de prédilection pour déterminer la composition chimique et déterminer les populations est l'otolithe, mais les écailles et les vertèbres incorporent aussi des éléments traces dans leur matrice et pourraient être utilisées.

Dans les années 1970, un grand nombre de techniques sont mises en oeuvre pour procéder à la détermination de l'identité de stock et à la discrimination des sous-populations (Calaprice, 1971, 1975; Bagenal *et al.*, 1973). Plusieurs études ont confirmé l'intérêt de l'emploi de la chimie

des otolithes avec l'utilisation d'une variété de techniques comme la spectrométrie d'absorption atomique (AAS) (Gauldie et Nathan, 1977; Gauldie *et al.*, 1980), la spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif (ICP-AES) (Brazner *et al.*, 2004), l'analyse par activation neutronique (Papadopoulou *et al.*, 1978, 1980), la spectrométrie de masse à plasma inductif (ICPMS) (Brazner *et al.*, 2004; Méthot *et al.*, 2005), la microscopie à rayon X (PIXE : Proton Induce Xray Emission) (Calaprice, 1985; Gauldie *et al.*, 1986) et la microscope électronique à balayage (SEM) utilisant un système Wavelength-dispersive (WD) (Radtke, 1987; Kalish, 1989) ou Energy-dispersive (ED) (Lapi et Mulligan, 1981; Mulligan *et al.*, 1987). À l'aide de la chimie des otolithes, Campana *et al.* (1994a) ont réussi à discriminer la présence de sous-populations de morues sur cinq frayères de l'Atlantique Nord-Ouest. Avec la même approche, Méthot *et al.* (2005) ont déterminé que 50 % des femelles du banc de Burgeo (région 3Ps) étaient originaires du nord du golfe du Saint-Laurent. Toutefois, Campana (1999) met en évidence la présence de faibles concentrations des éléments détectables dans les otolithes ce qui peut limiter une différenciation convenable entre individus et donc expliquer la nécessité d'analyser en parallèle la composition chimique d'autres pièces calcifiées des poissons comme les vertèbres et les écailles (S. Campana, Bedford Institute of Oceanography, comm. pers.).

L'analyse des écailles et des vertèbres, dans un but de discrimination des populations en fonction de leur composition chimique n'est que brièvement traitée dans la littérature (Lapi et Mulligan, 1981; Belanger *et al.*, 1987 ; Radtke *et al.*, 1990; Secor 1992; Secor *et al.*, 1995). Les études de ces dernières années se sont principalement concentrées sur l'analyse des otolithes (Campana, 1999). Ces études sont moins nombreuses car ces structures calcifiées sont considérées comme chimiquement moins stables que les otolithes.

4.1. Les écailles

Les écailles ont été initialement utilisées dans la détermination de l'âge de nombreuses espèces aquatiques (Carlander, 1987), puisqu'il y a une persistance de structures identifiables au cours du temps.

Par la suite, des études se sont intéressées à la composition chimique des écailles, car lors de la croissance du poisson, les écailles comme les otolithes, incorporent à leur matrice calcaire différentes concentrations d'éléments traces présents dans l'eau ambiante (Wells *et al.*, 2000a, Perga et Gerdeaux, 2003). Lapi et Mulligan (1981) indiquent que les écailles sont métaboliquement inertes durant la majorité de la vie du poisson, par conséquent, leur composition élémentaire varie relativement peu durant la vie des individus.

L'utilisation des écailles présente de nombreux avantages: elles constituent un matériel relativement facile à obtenir, à entreposer et, contrairement aux otolithes, la méthode de préparation est moins complexe (Coutant et Chen 1993). Leur prélèvement ne nécessite pas le sacrifice de l'organisme et donc ces échantillons peuvent provenir de populations menacées d'extinction.

La concentration de la majorité des éléments dans les écailles est corrélée avec la chimie de l'environnement (Wells *et al.*, 2000b). Belanger *et al.* (1987) ont employé l'analyse élémentaire des écailles du bar rayé (*Morone saxatilis*) pour différencier les habitats de cette espèce. La présence de l'élément strontium (Sr) dans les écailles a été utilisée pour identifier les

mouvements des poissons diadromes (Bagenal *et al.*, 1973; Moreau et Barbeau 1979; Halden *et al.*, 1995). En effet, la concentration élevée de Sr dans les écailles est traitée comme un indicateur de période de vie passée en mer (Radtke *et al.*, 1990; Secor 1992; Secor *et al.*, 1995, Campana *et al.*, 1997).). L'analyse des éléments traces dans les écailles a été utilisée pour comprendre la structure de stocks (Pender et Griffin 1996), déterminer les habitats (Bagenal *et al.*, 1973) et identifier les zones de nurseries (Coutant et Chen 1993). Pender et Griffin (1996) ont déterminé la composition élémentaire des écailles pour le poisson barramundi (*Lates calcarifer*). Les éléments retrouvés dans ces écailles sont : Al, Ba, Ca, Mg, Na, Sr, Fe, Mn, Zn, La et Ce. Lapi et Mulligan (1981) ont réussi à assigner 63% de saumons nerka (*Oncorhynchus nerka*) de la région de l'île de Vancouver à leur lac d'origine en se servant de la chimie des écailles à l'aide de la microscopie électronique à balayage couplée à une analyse par rayons X à énergie dispersive. Muhlfeld *et al.* (2005) ont analysé les empreintes chimiques des écailles de truites fardées indigènes (*Oncorhynchus clarki lewisi*) échantillonnées dans treize golfes du système de drainage du Montana et obtiennent des taux corrects de classification dans les zones de nurseries $\geq 78\%$ et atteignant 100%. Wells *et al.* (2000b) démontrent que la signature des écailles de juvéniles d'acoupa royal (*Cynoscion regalis*) sont similaires aux résultats obtenus sur les otolithes des mêmes poissons. Par ailleurs, Gillanders (2001) démontre la présence d'une corrélation significative entre les concentrations d'éléments retrouvés dans les écailles et les otolithes.

Certaines études démontrent tout de même des limitations dans l'utilisation de la chimie des écailles pour discriminer des populations. Wells *et al.* (2003) déterminent la présence d'une différence dans les signatures des écailles et des otolithes d'acoupas royaux (*Cynoscion regalis*) échantillonnés dans le détroit de Pamlico et les baies de Chesapeake et du Delaware avec la

présence d'une dégradation des écailles après la période juvénile et après la maturation. De plus, les études de Bilton et Robins (1971) et Bilton (1975) démontrent que les écailles sont vulnérables à la résorption lors d'une demande importante en calcium par l'individu. Les écailles peuvent continuer à cristalliser après la formation des circuli (Fouda, 1979). Courtemanche *et al.* (2005) analysent les schémas migratoires de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) à l'aide du microscope électronique muni d'une microsonde à dispersion de longueur d'onde (WD-EM). L'étude démontre que le relief de la surface des écailles peut diminuer la précision de l'analyse et que le ratio Sr/Ca obtenu au niveau du circuli des écailles apportent de faibles indications dans le mouvement des individus entre l'eau douce et l'eau salée. Dans une étude toujours basée sur l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) Courtemanche *et al.* (2006) démontrent que la microchimie des écailles permet uniquement de révéler la présence ou non d'une exposition à l'eau de mer mais ne suffit pas pour déterminer les patrons de migration entre l'eau douce et l'eau de mer. La chimie des écailles n'est donc pas toujours efficace pour reconstruire l'environnement des individus.

D'autres études se concentrent sur la signature isotopique des écailles de poissons dans un but de reconstitution des chaînes alimentaires en vue d'observer les changements de l'habitat au cours du temps (Perga and Gerdeaux, 2003 ; Gerdeaux and Perga, 2006 ; Hutchinson and Truman, 2006) et aussi comme marqueur du lieu de développement des individus (Kennedy *et al.*, 2005). L'utilisation des écailles à la place des muscles dans les études de reconstitution trophique a pour avantage d'être un échantillonnage non létal. En effet, la signature isotopique des écailles permet de reconstruire les variations des paramètres environnementaux et donc de refléter la réponse de l'écosystème face aux changements de l'environnement comme le suivi des

cycles eutrophisation-oligotrophisation au niveau des lacs (Perga et Gerdeaux, 2003 ; Gerdeaux et Perga, 2006). Perga et Gerdeaux, (2003) se concentrent sur les isotopes $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des écailles de lavaret (*Coregonus lavaretus*) pour analyser les changements trophiques et les changements de productivité du lac Léman. L'étude démontre que l'utilisation des isotopes au sein des écailles dans un but de reconstruction de l'état trophique d'un lac peut être très utile. Gerdeaux et Perga (2006) effectuent une étude similaire pour déterminer le schéma de variation de $\delta^{13}\text{C}$ dans des écailles de lavaret (*Coregonus lavaretus*) durant l'eutrophisation et l'oligotrophisation au niveau de deux lacs subalpins, le lac Léman et le lac de Constance.

Wainright *et al.* (1993) ont étudié les changements à long terme du réseau trophique du banc Georges à l'aide de l'analyse des isotopes du carbone et de l'azote dans les écailles de sept espèces démersales. Cette étude a permis d'observer des diminutions de niveau trophique des espèces en fonction de l'exploitation commerciale. Kennedy *et al.* (2005) utilisent les marqueurs isotopiques N, C et Sr cette fois ci comme indicateurs du lieu de développement de jeunes saumons (*Salmo salar*) collectés dans douze tributaires du fleuve Connecticut, États-Unis. Le taux de classification correct à l'aide des isotopes des écailles permet de différencier 73% des sites.

Ces études démontrent la possibilité d'utiliser la chimie des écailles au même titre que celle des otolithes. Les écailles représentent donc une structure alternative en vue de déterminer l'identité de stocks.

4.2. Les vertèbres

Hederström (1759) est le premier à proposé d'utiliser les cernes des vertèbres comme méthode d'estimation de l'âge des poissons. Cependant, il faudra attendre la fin du XIX^e siècle pour voir se développer les premières tentatives sérieuses d'estimation de l'âge se basant sur les vertèbres (Natanson et al, 2002; MacNeil et Campana, 2003). Par la suite, des études ont démontré que les vertèbres, au même titre que les écailles présentaient une possibilité d'utilisation pour déterminer l'empreinte chimique des espèces (Calaprice, 1985).

Calaprice (1985) propose l'hypothèse que les organismes acquièrent une forme d'empreinte chimique dans les tissus du squelette (vertèbres) indiquant les propriétés spécifiques de leur microniche et microhabitat. Dans son étude, il définit la composition élémentaire d'une coupe de vertèbre de thon rouge (*Thunnus thynnus*) à l'aide du microscope d'émission à rayon X (PIXE). Il a observé une variation cyclique et saisonnière de la teneur des éléments Ca, Sr, P, S, Cl, Br et Zn. D'après son étude, la composition chimique des vertèbres varie en fonction des régions où les poissons ont évolué. L'étude montre qu'une forme d'enregistrement écologique existe dans la composition du squelette des espèces pélagiques et que des variations temporelles et géographiques existent dans la chimie des vertèbres de la même façon que pour les otolithes et les écailles. Vas *et al.* (1990) démontrent à l'aide de la spectrométrie d'absorption atomique (AAS) qu'un certain nombre d'éléments métalliques sont incorporés dans les vertèbres de requins.

Plusieurs études se sont concentrées sur la détermination de la composition chimique des vertèbres du saumon nerka (*Oncorhynchus nerka*) à l'aide de la spectrométrie à rayons X (Behrens Yamada *et al.*, 1987a ; Mulligan *et al.*, 1983). Behrens Yamada *et al.* (1987a) ont déterminé que la composition chimique des vertèbres de ce saumon est due à des facteurs génétiques et environnementaux en se basant sur l'étude de neuf éléments : P, S, K, Ca, Mn, Cu, Zn, Br et Sr. Mulligan *et al.* (1983) ont déterminé à 80-95% les stocks d'origine de saumons nerka provenant d'Alaska et de l'île de Vancouver en se basant toujours sur la chimie des vertèbres.

5. Objectifs de l'étude

Différentes études justifient l'utilisation de la chimie de structures calcifiées pour mieux déterminer les origines des poissons appartenant à un même stock. Cette étude a comme objectif principal de fournir des outils susceptibles de vérifier l'existence de sous-populations de morue (*Gadus morhua*) au sein de l'unité de stock 3Pn,4RS du nord du golfe du Saint-Laurent en utilisant la chimie des écailles et des vertèbres.

Un sous objectif de l'étude est de vérifier l'applicabilité de la chimie des vertèbres et des écailles, puis de mettre en place la méthode pour déterminer la composition chimique de ces structures à l'aide de la microscopie électronique à balayage munie d'un système EDS (Spectromètre d'énergie dispersive). En effet, bien que la chimie des otolithes soit bien déterminée dans la littérature (Campana, 1999), une validation de la chimie des vertèbres et des

écaïlles est nécessaire car les études utilisant un système SEM-EDS pour déterminer les éléments chimiques de ces structures sont peu nombreuses (Lapi and Mulligan, 1981).

Un autre sous-objectif sera de vérifier la présence d'une corrélation entre les éléments retrouvés dans les écaïlles et les vertèbres d'un même individu. Peu d'études ont été effectuées sur la comparaison des structures calcifiées, toutefois, certaines études suggèrent la présence d'une corrélation importante entre la chimie des écaïlles et des otolithes (Wells *et al.*, 2000*b*; Gillanders, 2001; Wells *et al.*, 2003).

Cette étude se base sur des hypothèses faites à partir de l'analyse d'Yvelin *et al.* (2005), montrant qu'au sein du stock 3Pn,4RS, les schémas migratoires estivaux sont différents, se traduisant par la possibilité de sous-populations. Chaque schéma migratoire au sein de 3Pn4RS pourrait représenter une sous-population du stock dont les structures calcifiées posséderaient leurs propres caractéristiques de composition élémentaire.

Cette étude vise donc à présenter les éléments chimiques contenus au niveau du nucleus des vertèbres et des écaïlles des morues recueillies dans différentes régions du nord du golfe au cours de l'année 2006 dans le but d'améliorer les connaissances sur le stock 3Pn,4RS.

CHAPITRE 1 - MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Échantillonnage

L'échantillonnage a cherché à couvrir l'ensemble du stock 3Pn,4RS, du sud de Terre-Neuve à la Côte-Nord (Fig.1).

Les prélèvements ont été réalisés durant l'été en vue de maximiser la probabilité de séparation des composantes du stock, car, d'après l'étude d'Yvelin *et al.* (2005), les morues du stock du nord du golfe se séparent en des aires estivales différentes. Pour 3Pn (sud de Terre-Neuve), un échantillonnage supplémentaire a eu lieu en novembre pour vérifier le mélange de toutes les sous-unités du nord du golfe durant l'hiver (Méthot *et al.*, 2005). De plus, des individus ont été récoltés dans la région 3Ps, dans le but de détecter un possible mélange de ce stock avec 3Pn. Pour finir, des écailles provenant du stock du sud du golfe du Saint-Laurent (4T) ont été obtenues afin d'avoir un site de référence pour l'étude.

Deux sources de relevés ont procuré les morues nécessaires à l'étude : les relevés des pêches sentinelles aux engins fixes et le relevé scientifique du ministère des Pêches et des océans. Ces deux relevés ont procuré un total de 718 individus (Fig. 1, Tableau 1).

Les relevés des pêches sentinelles aux engins fixes (filets maillant, palangres) ont permis d'obtenir un échantillonnage ponctuel dans le temps et l'espace, dans le but de cibler les zones potentielles de présence de sous-populations du stock. Les échantillons des pêches sentinelles pour l'étude proviennent de huit régions différentes du golfe du Saint-Laurent :

Deux régions au niveau de la Côte Nord :

- la Tabatière
- St Paul's River

Cinq régions pour Terre-Neuve :

- Port aux Basques (3Pn)
- Stephenville (4R)
- Port au Choix (4R)
- St Barbe (4R)

Une région pour le sud du golfe :

- Île du Prince Édouard (4T)

Le relevé scientifique au chalut d'août 2006 nous a procuré des échantillons sur l'ensemble du nord du golfe du Saint-Laurent avec un effort de pêche se répartissant sur plus de 220 stations. Ce relevé, effectué à bord du navire de recherche Téléost, a permis de compléter la gamme de taille des individus de l'étude en échantillonnant principalement des juvéniles et de compléter la couverture spatiale des prélèvements, dont la région de l'île d'Anticosti.

Immédiatement après la capture, la longueur totale (cm), le poids total (0,1g) et le sexe des individus ont été notés ainsi que la date et la position du prélèvement. Par la suite, les morues étaient sectionnées pour ne conserver que la partie antérieure du corps (de la tête à la nageoire dorsale) qui a été congelée et envoyée au laboratoire.

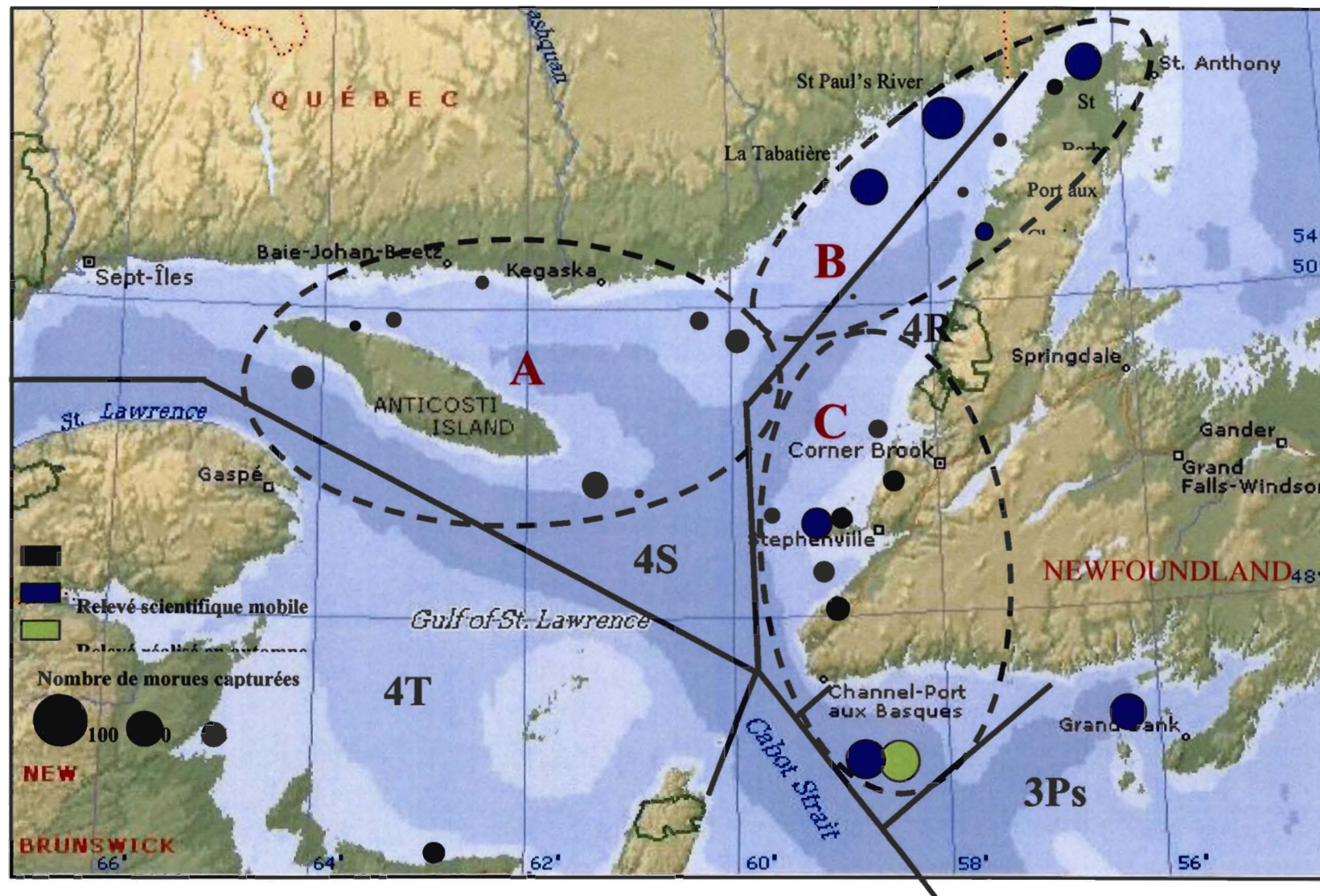


Fig. 1. Carte de la zone d'étude montrant les sites d'échantillonnages durant la saison 2006. Les cercles sont proportionnels à l'effort d'échantillonnage et les ellipses représentent les trois principales composantes du nord du golfe du Saint-Laurent décrites par Yvelin *et al.* (2005).

Tableau 1. Résumé des données concernant les morues échantillonnées durant la saison 2006.

Détermination des zones	Sites d'échantillonnages	Type de relevé	Date de capture	N	Gamme de taille (mm)	Moyenne tailles ± écart type (mm)
Région A	Nord Anticosti	Relevé mobile	août-06	44	145-451	300 ± 90
	Sud Wolf Bay	Relevé mobile	août-06	30	230-670	360 ± 120
	Sud Anticosti	Relevé mobile	août-06	31	222-584	370 ± 100
Région B	St Paul's River	Pêche sentinelle	Juillet et Août 2006	77	450-700	610 ± 50
	La Tabatière	Pêche sentinelle	Juillet et Août 2006	57	332-680	550 ± 70
	Port au Choix	Pêche sentinelle	août-06	17	490-700	580 ± 70
	Détroit de Belle Isle	Pêche sentinelle/mobile	août-06	80	140-770	430 ± 180
Région C	Stephenville	Pêche sentinelle/mobile	août-06	166	173-700	420 ± 140
	Port aux Basques	Pêche sentinelle	août-06	63	400-740	550 ± 85
Sud de Terre-Neuve	Port aux Basques	Pêche sentinelle	nov-06	76	420-700	560 ± 80
	St Brides (3Ps)	Pêche sentinelle	juil-06	59	430-860	640 ± 80
Sud du golfe	Île du Prince Édouard	Relevé sentinelle mobile	sept-06	18	390-480	450 ± 25
	Total			718		

2. Préparation des échantillons

À l'origine, l'étude visait à définir l'empreinte chimique de trois structures calcifiées : les otolithes, les écailles et les vertèbres. Une analyse préliminaire a montré que le signal issu des otolithes était trop faible pour être interprétable. Le travail s'est donc consacré seulement aux écailles et aux vertèbres.

Les morues ont été disséquées pour prélever les cinq premières vertèbres qui ont été nettoyées grossièrement à l'aide d'un scalpel puis placées dans un sac et congelées à -25°C . Les écailles ont été prélevées le long de la ligne latérale, nettoyées et conservées entre deux lames de verre. On a essayé d'échantillonner pour chaque morue les deux structures calcifiées. Toutefois, pour certains individus, surtout dans le cas des juvéniles, les écailles n'ont pu être échantillonnées, le matériel étant abîmé en raison de la manipulation lors de l'échantillonnage et de la conservation des têtes de morues.

Les vertèbres ont subi un nettoyage préliminaire dans un bain à ultrasons rempli d'eau Milli Q. Le temps de lavage dans le bain était d'environ 60 min, variant selon la taille des vertèbres et la quantité de matériel biologique déposé. La cinquième vertèbre a été isolée, nettoyée par brossage et rincée à l'eau Milli Q. Elle a ensuite été coupée transversalement à l'aide d'une scie Isomet, pour obtenir une surface la plus plane possible pour répondre aux exigences du SEM-ED. Un nouveau nettoyage dans le bain à ultrasons ($\sim 15\text{min}$) a été effectué pour assurer une bonne décontamination de la vertèbre qui a été à nouveau rincée à l'eau Milli Q (3x) et séchée à l'air. Le segment sec a été fixé sur un support pour microscopie électronique

(Aluminum, SEM specimen Mount Stub, 12mm) à l'aide d'un film adhésif en carbone (Carbon Adhesive Tabs, 12mm).

L'état des écailles a été vérifié sous la loupe binoculaire afin de ne retenir que les écailles ayant un centre bien défini et qui ne sont ni endommagées ni en cours de régénération. Notons qu'aucune méthode de lavage précise des écailles n'a été définie dans la littérature. Certains auteurs ont utilisé une solution légèrement acidifiée (Johnson, 1989) ou effectué un trempage dans une solution de peroxyde d'hydrogène et utilisé un sonificateur (Wells *et al.*, 2003). Pour cette étude, les écailles ont été simplement lavées à l'aide d'eau Milli Q puis essuyées sur du papier absorbant en vue d'ôter le mucus présent et enfin relavées et séchées à l'air. En vue de l'analyse, deux écailles par individu ont été fixées sur un support pour microscopie à l'aide d'un adhésif en carbone.

Les vertèbres et les écailles n'ont subi aucun enrobage métallique avant l'analyse car, d'après Mulligan *et al.* (1987), leur surface peut être examinée directement par SEM-EDS.

3. Analyse des éléments chimiques

Les concentrations des éléments chimiques au sein des écailles et des vertèbres de morues ont été déterminées à l'aide du système SEM JEOL 6460LV, un microscope électronique à balayage (SEM) couplé à un système d'analyse par rayon X à énergie dispersive (ED) (Oxford Scientific, INCA X-Stream). La microscopie électronique à balayage (SEM : *Scanning Electron Microscopy*) est une technique de microscopie non destructive fondée sur le principe des interactions électrons-matière (Fig. 2). Le microscope électronique à balayage fournit des images

en trois dimensions des surfaces observées en utilisant les électrons secondaires qui sont émis à la surface d'un échantillon lorsque celui-ci est balayé par un fin faisceau d'électrons primaires dont la source est un filament de tungstène parcouru par un courant de chauffage (Fig. 3).

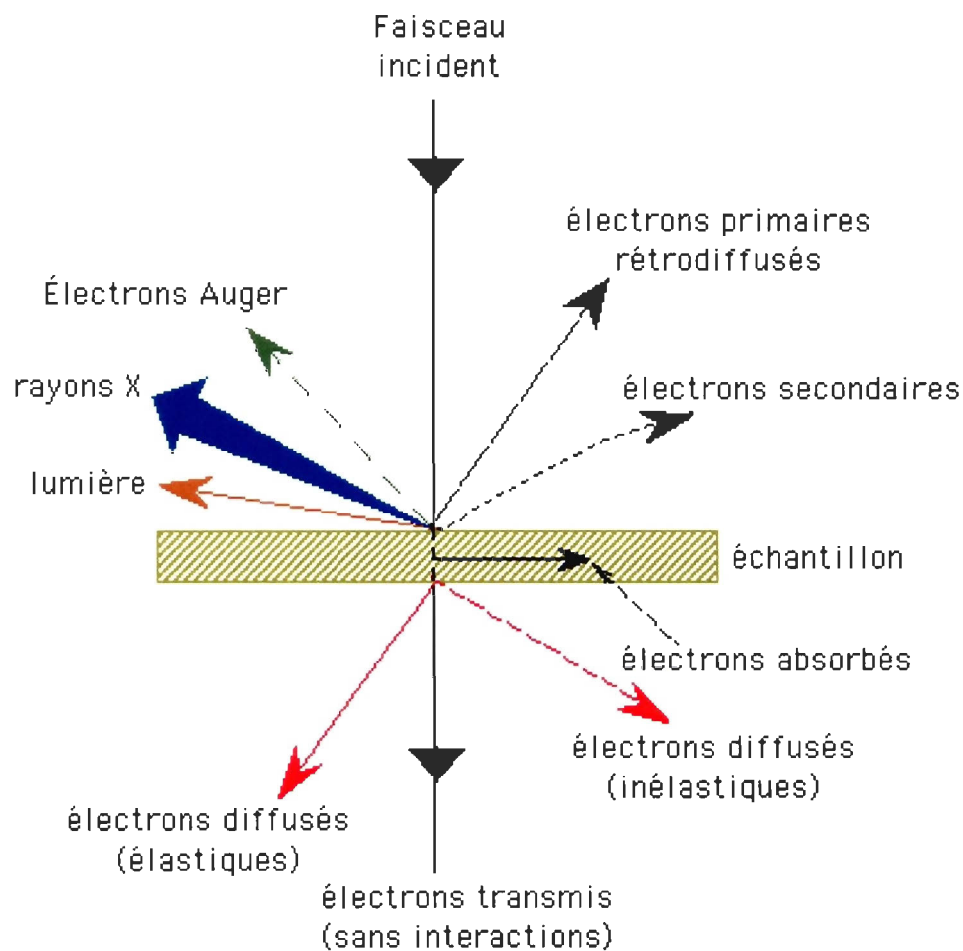


Fig. 2. Schéma illustrant l'ensemble des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon ([materiaux.ecam.fr :savoirplus/meb/meb.html](http://materiaux.ecam.fr:savoirplus/meb/meb.html)).

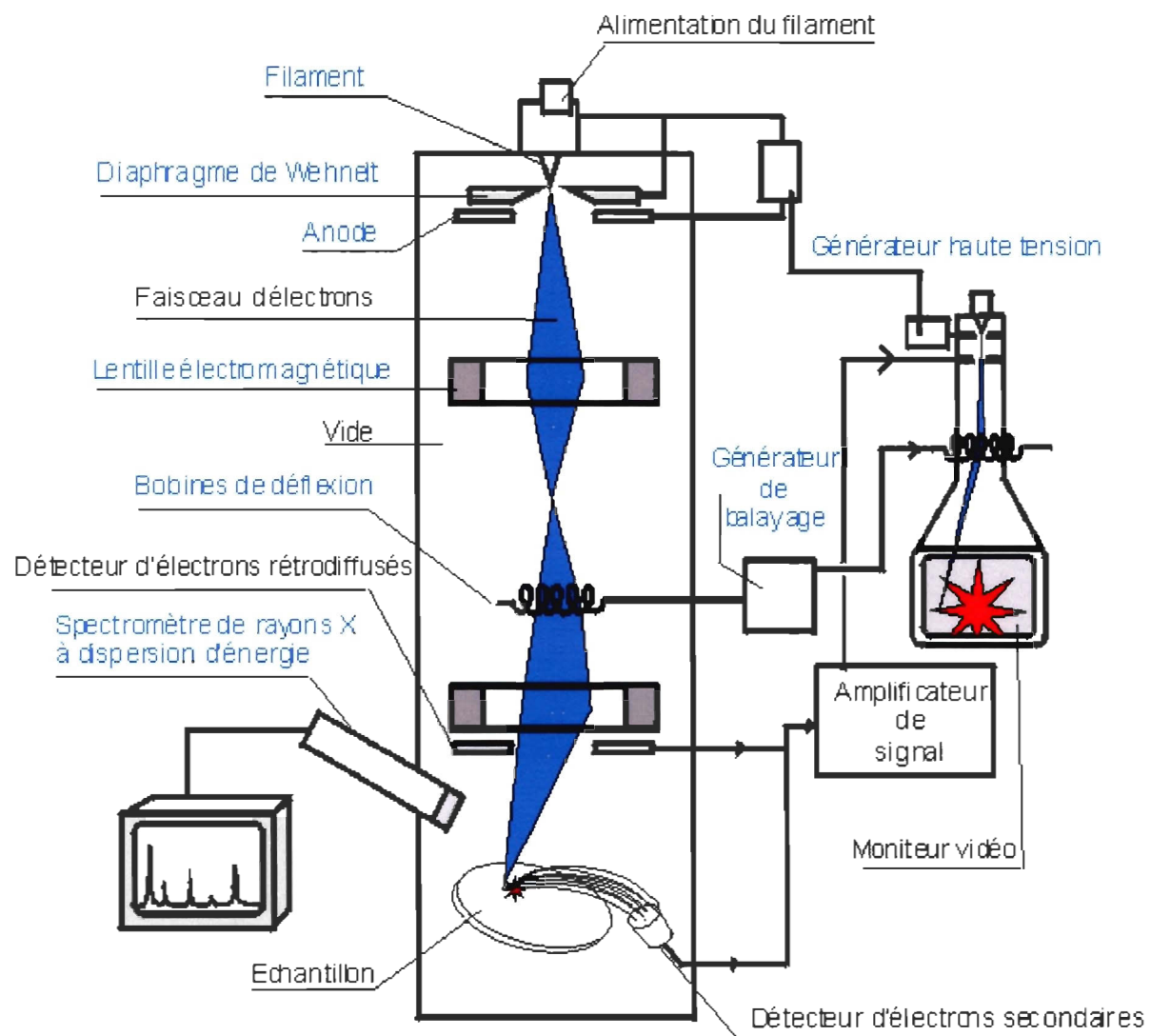


Fig. 3. Schéma descriptif du SEM-ED (materiaux.ecam.fr/savoirplus/meb/principes.html).

Le couplage de ce microscope avec un système d'énergie dispersive (ED), permet de déterminer la composition élémentaire précise des matériaux. La technique d'énergie dispersive identifie et mesure les éléments présents dans l'échantillon (Gunn *et al.*, 1992). SEM et ED en association fournissent une approche analytique puissante pour la détermination de l'empreinte chimique des structures. La microanalyse permet d'identifier et de quantifier les éléments chimiques présents à la surface d'un échantillon grâce aux rayons X caractéristiques des éléments constituant l'échantillon qu'il émet.

La technique SEM-ED présente certaines limites dans la détection des éléments chimiques présents au sein des structures calcifiées. Campana *et al.* (1997a) ont montré la présence d'une différence de rendement des appareils utilisés pour déterminer la chimie des structures calcifiées pouvant expliquer les différences de composition chimique observées entre plusieurs études. Pour comparer la sensibilité de ces outils, Campana *et al.* (1997a) ont distribué des otolithes dans huit laboratoires en vue d'exécuter le dosage de dix éléments à l'aide de quatre techniques différentes : PIXE, SEM-EDS, SEM-WD et LA-ICPMS. L'étude a permis de montrer que les éléments les plus abondants dans les otolithes, comme Na et K sont mesurés de manière correcte uniquement avec le système SEM-EDS alors que la détermination des éléments traces nécessite l'utilisation de PIXE ou de LA-ICPMS. Sr était mesuré avec justesse et fidélité avec tous les outils sauf SEM-ED, d'ailleurs, en général, c'est le SEM-ED qui a montré avoir les limites de détections (LOD) les plus importantes et d'être la technique la moins précise pour la détermination des éléments chimiques, comme ceci a déjà été exprimé lors d'autres études (Gunn *et al.*, 1992; Kalish, 1990). Toutefois, Thresher (1999) explique que les nouveaux microscopes EDS sont de plus en plus performants et la distance entre les techniques se rétrécit.

Pour cette étude, le faisceau d'électrons est orienté pour cibler le nucleus pour les écailles et le premier annuli des vertèbres (Fig. 4), car ils correspondent à la première année de croissance des individus et représentent un marqueur potentiel de la zone de développement. La zone d'analyse de l'empreinte chimique des vertèbres diffère de celle des écailles, pour des raisons méthodologiques précises. En effet, lors de la mise en place du protocole d'étude des vertèbres à l'aide du microscope électronique, le nucleus des vertèbres est apparu comme possédant peu d'éléments, seul le calcium étant déterminé. Pour obtenir des résultats exploitables la zone d'étude a donc été agrandie. Les conditions d'exposition sont un voltage de 20kV, un angle de 0°C, un grossissement de 400x et un temps d'exposition de 1000 s (Gunn *et al.*, 1992; Sauer et Watabe, 1989).

Le spectre de rayon X (Fig. 5 et Fig. 6) est analysé avec le logiciel INCA X-Stream et les données sont exprimées en pourcentage de poids pour chaque élément chimique détecté.

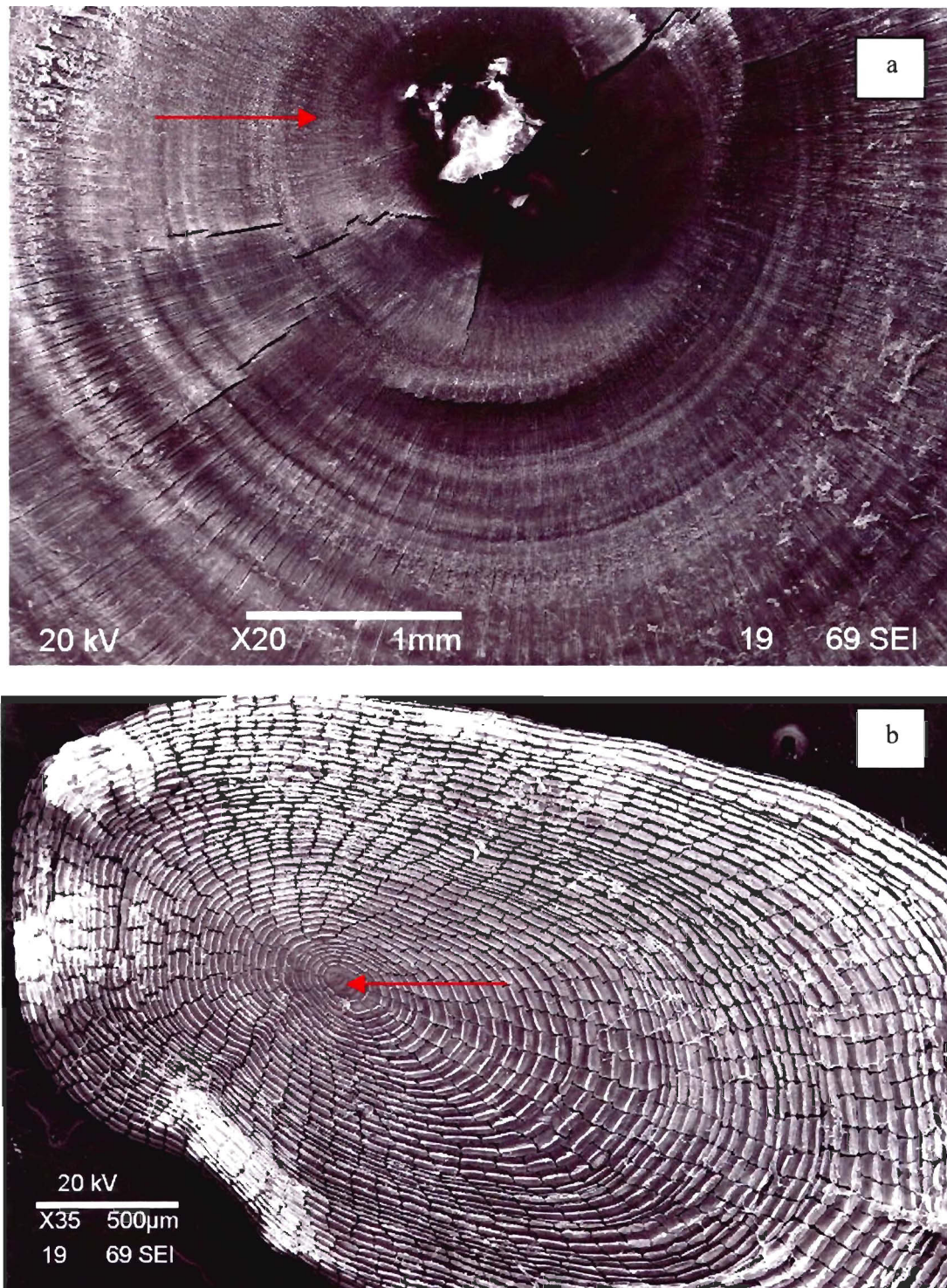


Fig. 4. Images en microscopie électronique à balayage avec un voltage de 20keV, a) d'une vertèbre et b) d'une écaille de morues. La flèche rouge représente la zone d'analyse à l'aide du système à énergie dispersive.

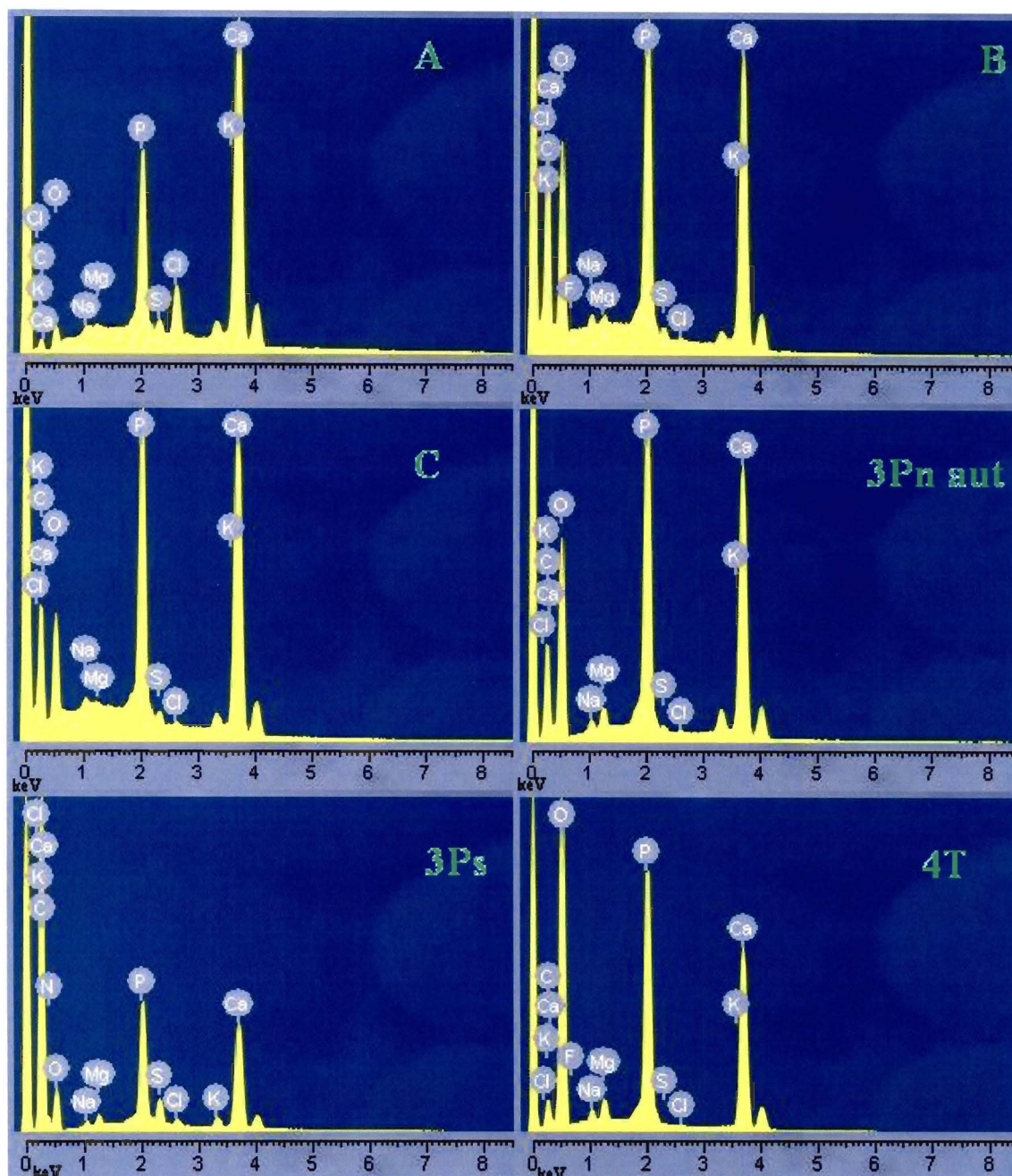


Fig. 5. Spectres obtenus à l'aide du SEM-ED au niveau du nucléus des écailles de morue des six régions du golfe du Saint-Laurent. (C : Carbone, Ca : Calcium, Cl : Chlore, F : Fluor, K : Potassium, Mg : Magnésium, N : Azote, Na : Sodium, O : Oxygène, P : Phosphore, S : Soufre, Sr : Strontium).

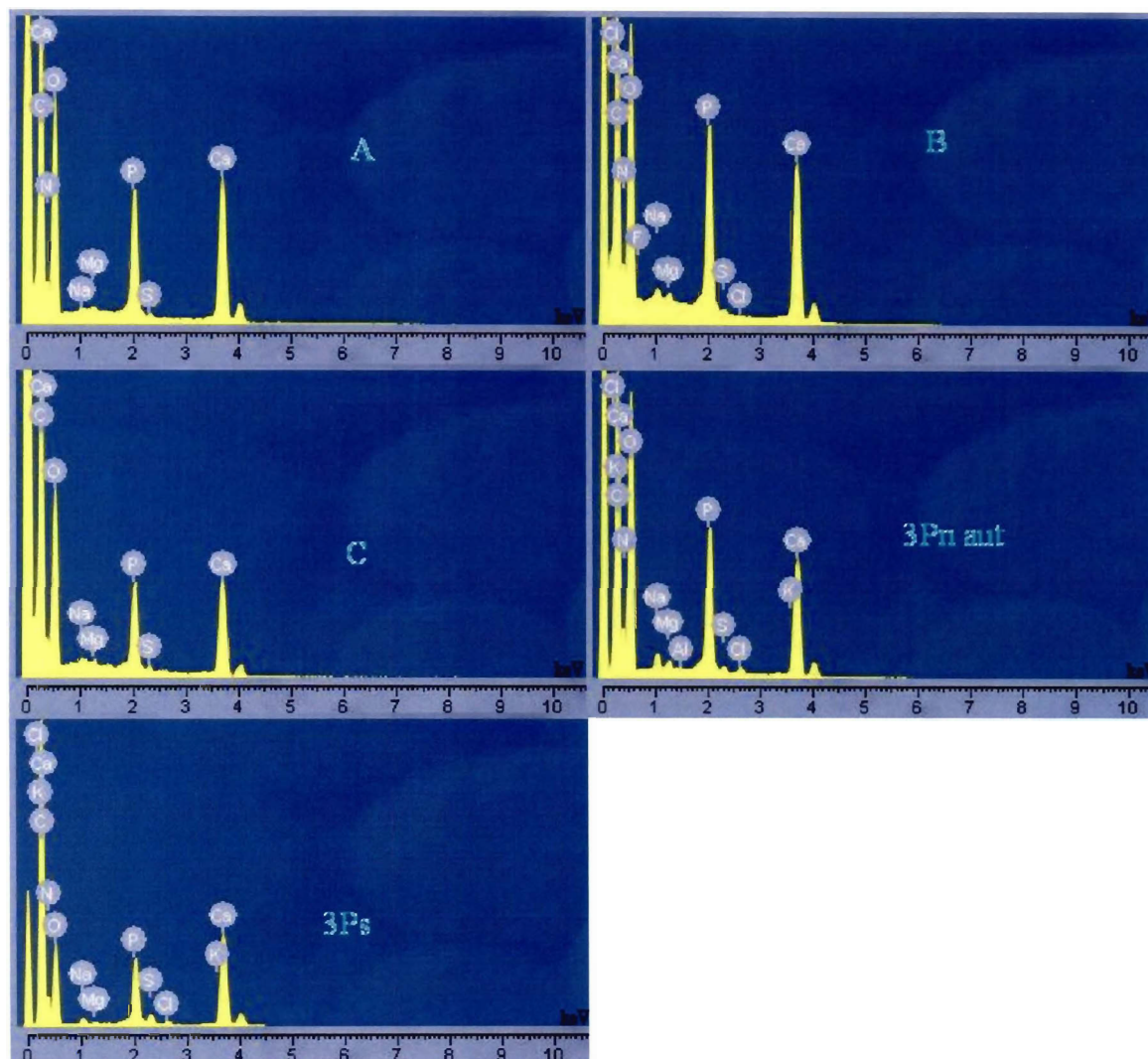


Fig. 6. Spectres obtenus à l'aide du SEM-ED au niveau des vertèbres de morues des cinq régions du golfe du Saint-Laurent. (Al : Aluminium, C : Carbone, Ca : Calcium, Cl : Chlore, F : Fluor, K : Potassium, Mg : Magnésium, N : Azote, Na : Sodium, O : Oxygène, P : Phosphore, S : Soufre).

4. Analyses statistiques

Pour les analyses statistiques, on a divisé les individus du stock du nord du golfe du Saint-Laurent en trois groupes suivant les données de l'étude d'Yvelin *et al.* (2005). La région A correspond aux individus se situant dans le secteur de l'île d'Anticosti (4S), la région B regroupe les individus du nord-est du golfe comprenant des individus de 4R et 4S et pour finir la région C est déterminée par les individus du sud-ouest de Terre-Neuve, 4R et aussi 3Pn (Fig. 1).

La normalité des concentrations et l'homogénéité des variances des éléments chimiques ont été vérifiées à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov et du test de Bartlett (Winer *et al.*, 1991). Ca et P sont distribués selon une loi normale sans transformation, les autres éléments retrouvés dans les écailles (Mg, Na, Cl, K et S) nécessitent une normalisation par $\ln(y+1)$ pour se rapprocher de la normalité. En effet, l'ANOVA est suffisamment robuste pour accepter une certaine divergence de la normalité et les tests d'homogénéité des variances sont plus restrictifs que l'ANOVA elle-même (McGuinness, 2002). Les tests paramétriques ont été conservés avec une probabilité $\alpha=0,05$. Dans l'étude les concentrations des éléments ne sont pas divisées par Ca car ceci n'apporte aucune information supplémentaire, de plus plusieurs études sur la discrimination des sous-populations à l'aide de la chimie des structures calcifiées des individus analysent directement les éléments déterminés (Gillanders 2001 et 2005; Gillanders et Kingsford, 1996; Swan *et al.*, 2006). De Pontual *et al.* (2003) comparent les variations des empreintes chimiques des otolithes de soles (*Solea solea*) juvéniles sauvages et de soles élevées en captivités pour observer les effets ontogéniques et les changements de l'habitat sur la chimie des otolithes, principalement sur les éléments K, Na et Sr/Ca. Dans cette étude, seul Sr est divisé par le

calcium, car les caractéristiques du strontium sont proches de celles du calcium et que le strontium est donc incorporé dans la matrice de l'otolithe par substitution du calcium formant SrCO_3 .

Une analyse de covariance (ANCOVA) a été réalisée pour déterminer l'effet de la taille des poissons sur la concentration des éléments chimiques. Quand les variables présentent une corrélation positive avec la taille, l'effet de la taille a été éliminé en standardisant les concentrations des éléments chimiques à l'aide de la relation de Bergenius *et al.* (2005) :

$$C_{ij,adj} = C_{ij} - b.(FL_{ij} - MFL_j)$$

où $C_{ij,adj}$ correspond à la concentration de l'élément chimique du poisson i appartenant au groupe j standardisé avec la moyenne des tailles du groupe, C_{ij} est la concentration avant standardisation, FL_{ij} est la taille du poisson i , b est la pente de la relation $C_{ij}:FL_{ij}$, et MFL_j est la moyenne des tailles à l'intérieur du groupe j .

Après la transformation des données, une ANCOVA de contrôle a été effectuée. Cette analyse aura pour but de confirmer l'absence de corrélation significative entre les concentrations des éléments chimiques et la taille des individus (ANCOVA, $P < 0,05$) après la normalisation.

Une analyse de variance (ANOVA) couplée avec un test multiple de Tukey a été utilisée pour déterminer les éléments chimiques apportant une discrimination significative entre les sites. Une analyse de variance multivariée (MANOVA) a été utilisée pour déterminer si les empreintes chimiques des zones de l'étude diffèrent significativement entre elles. Une analyse discriminante complète (CDA) a été utilisée en incluant les variables apportant des informations significatives

sur la différenciation des sites. La procédure de validation croisée (cross validation) par la méthode de Jackknife a été utilisée pour de déterminer le pourcentage correct de classification.

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide des logiciels SYSTAT version 10.2 pour Windows et Xlsat-pro version 7.5 pour Windows.

CHAPITRE 2 - RÉSULTATS CONCERNANT LES ÉCAILLES

1. Discrimination des composantes du stock de morue du nord du golfe du Saint-Laurent

1.1. Empreinte chimique des écailles

Sept éléments chimiques (Mg, P, Ca, Na, S, Cl et K) ont été détectés dans le nucleus des écailles de morues (Tableau 2). Leurs concentrations moyennes sont variables selon les zones géographiques (région A = Anticosti, région B = nord-est du golfe et région C = sud-ouest de Terre-Neuve). De tous les éléments recueillis, Ca et P ont les concentrations les plus élevées, alors que le magnésium (Mg) et le sodium (Na) sont les éléments présentant les plus faibles concentrations. La région A est caractérisée par des concentrations plus importantes en chlore (Cl), les moyennes des éléments pour les régions B et C paraissent semblables et le sud du golfe (4T) se distingue par de faibles concentrations en potassium (K) et de fortes concentrations en magnésium (Mg) que l'on observe aussi pour les régions 3Pn automne et 3Ps (Tableau 2).

La variation de la taille des individus analysés est importante (Fig. 7). Une analyse de covariance (ANCOVA) a été utilisée pour déterminer l'influence de la taille des individus sur les concentrations des éléments retrouvés dans les écailles, avec les éléments chimiques comme variable dépendante et la taille des individus (cm) comme covariable. Les sept éléments sont corrélés positivement avec la taille (Tableau 3). Pour standardiser les concentrations des éléments chimiques avec la taille, la relation de Bergenius *et al.* (2005) a été utilisée. Pour la suite des analyses statistiques, seules les concentrations des éléments standardisés avec la taille seront utilisées. Un test *t* de Student a été effectué pour vérifier l'influence de la méthode

d'échantillonnage, relevé scientifique et pêches sentinelle, sur les concentrations des éléments chimiques des écailles des morues échantillonnées sur même site. Le test a montré qu'il n'y avait pas de différence significative dans les concentrations chimiques des éléments (test t , $P > 0,5$) en fonction du type d'échantillonnage effectué.

Tableau 2. Moyennes et écarts-types des concentrations des éléments chimiques détectés dans le nucleus des écailles de morues (*Gadus morhua*). Les concentrations sont données en pourcentage de poids \pm écart type.

Éléments	Secteur Anticosti (A)	Nord-est du golfe (B)	Sud-ouest de Terre-Neuve (C)	3Pn automne	3Ps	Sud du golfe 4T
Mg	0,30 \pm 1,18	0,43 \pm 0,69	0,61 \pm 0,59	0,84 \pm 0,23	0,71 \pm 0,24	1,26 \pm 0,67
P	9,21 \pm 3,16	10,47 \pm 3,17	10,86 \pm 2,98	12,05 \pm 3,01	9,31 \pm 2,80	13,06 \pm 2,83
S	1,34 \pm 0,72	0,92 \pm 0,68	1,07 \pm 0,59	0,68 \pm 0,49	1,10 \pm 0,61	0,37 \pm 0,33
K	1,55 \pm 0,75	1,04 \pm 1,01	1,13 \pm 0,57	1,36 \pm 1,13	0,85 \pm 0,38	0,06 \pm 0,10
Cl	2,04 \pm 1,63	0,76 \pm 0,92	0,84 \pm 0,86	0,31 \pm 0,30	0,34 \pm 0,26	0,49 \pm 0,64
Ca	14,45 \pm 5,49	15,68 \pm 5,61	15,67 \pm 4,93	15,84 \pm 5,18	12,71 \pm 3,96	17,27 \pm 6,08
Na	0,83 \pm 0,40	0,55 \pm 0,31	0,60 \pm 0,32	0,57 \pm 0,19	0,41 \pm 0,21	0,38 \pm 0,17

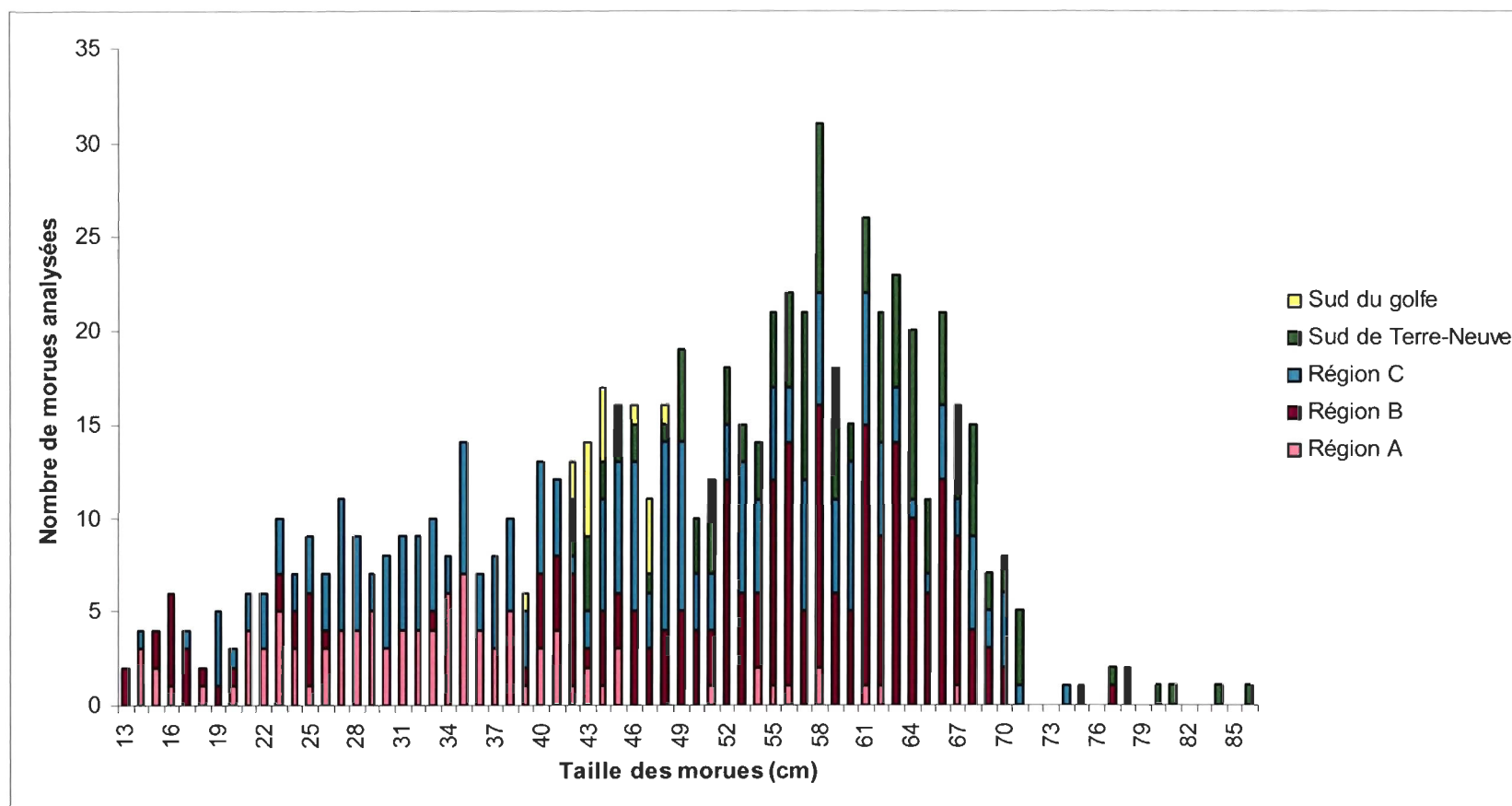


Fig. 7 .Taille des morues à la capture pour les cinq zones de l'étude.

Tableau 3. Résultats de l'ANCOVA à un facteur (taille) avec les éléments chimiques comme variables dépendantes (n = 718).

Variables dépendantes	source de variation	Somme des carrés	ddl = 1		Pente ± écart type
			F	P (erreur α)	
Na	Taille (cm)	0,411	12,153	0,001	-0,002±0,001
Mg		2,064	32,104	< 0,0001	-0,004±0,001
P		98,076	10,662	0,001	0,030±0,009
S		3,072	40,855	< 0,0001	-0,005±0,001
Ca		330,235	12,285	< 0,001	0,055±0,016
K		2,056	23,962	< 0,0001	-0,004±0,001
Cl		11,816	84,656	< 0,0001	-0,010±0,001

1.2. Analyse des zones du nord du golfe du Saint-Laurent (échantillonnage d'été, régions A, B et C)

En ne considérant que les prélèvements effectués en été, l'ANOVA indique que la différence entre les signatures chimiques des écailles est significative (ANOVA, $P < 0,001$) excepté pour le calcium (ANOVA, $P > 0,001$) (Tableau 4).

Tableau 4. Analyse de variance à sept facteurs sans répétition comparant l'influence des éléments chimiques (variables standardisées avec la taille) par rapport aux trois zones principales de l'étude (A, B, C) (n = 565).

Variables dépendantes	Somme des carrés	ddl = 2	
		F	P (erreur α)
Na	1,859	24,809	P<0,0001
Mg	5,531	45,709	P<0,0001
P	197,362	10,509	P<0,0001
S	3,088	20,676	P<0,0001
K	9,741	49,378	P<0,0001
Cl	20,527	66,350	P<0,0001
Ca	128,631	2,337	0,098

Les six éléments significatifs discriminent tous la région A par rapport aux régions B et C (Tukey's HSD, $P<0,05$). La séparation des individus des régions B et C est beaucoup plus subtile, et elle apparaît significative uniquement à l'aide des éléments Mg, S, K (Tukey's HSD, $P<0,05$). Ces variables définies par l'ANOVA contribuent significativement à la séparation des groupes selon la fonction linéaire discriminante (LDFA, Wilk's Lambda, $P<0,0001$). On observe une variation significative dans l'analyse multivariée des empreintes chimiques des trois régions (MANOVA, Wilk's Lambda = 0,471; $P<0,0001$).

L'analyse discriminante canonique (CDA) fondée sur un modèle comportant les six éléments chimiques Mg, P, Na, S, CL et K confirme une séparation entre les régions A, B et C du

golfe du Saint-Laurent (Fig. 8). La première valeur propre (eigenvalue) est de 56,9 et la deuxième de 35,0. La variable canonique 1 (axe x) sépare principalement la zone d'Anticosti (région A) et celle du nord-est du golfe (région B) et explique 61,9% de la dispersion totale.

La matrice Jackknifed (Tableau 5) indique une classification correcte de plus de 70% pour l'ensemble des régions. Elle est de 70 % pour le sud-ouest de Terre-Neuve (région C), 71 % pour le nord-est du golfe (région B) et 75 % pour le secteur de l'île d'Anticosti (région A).

Canonical Scores Plot

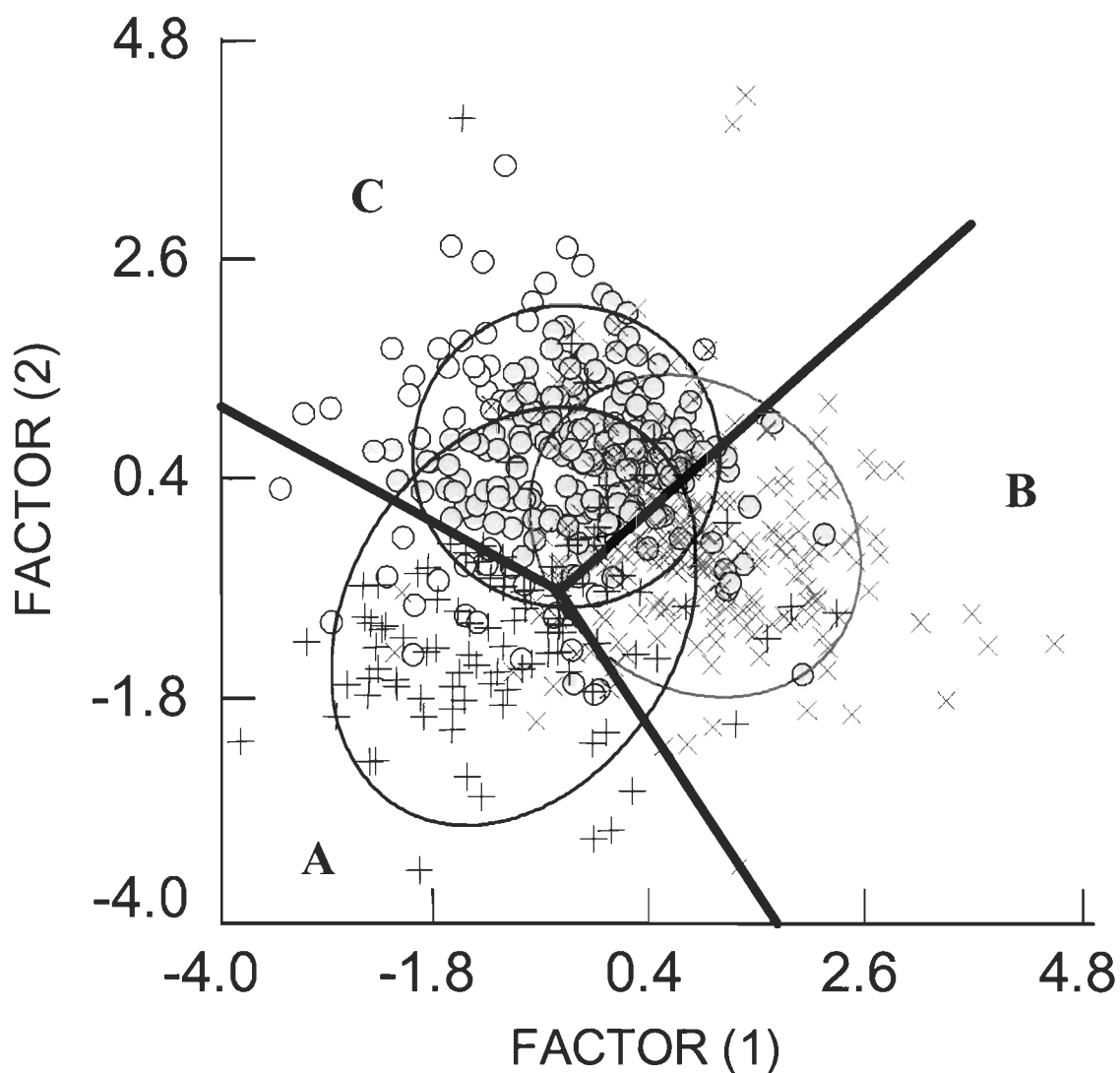


Fig. 8. Résultats de l'analyse discriminante canonique pour caractériser les différences d'empreintes chimiques (variables standardisées avec la taille) des écailles de morues du nord du golfe du Saint-Laurent entre les échantillons d'Anticosti (+, A), des individus du nord-est du golfe du Saint-Laurent (x, B) et ceux du sud-ouest de Terre-Neuve (o, C). Les lignes délimitent de manière visuelle les trois zones.

Tableau 5. Résultats de la classification Jackknifed des individus prélevés en été en fonction des zones (n = 565) selon l'analyse discriminante. Les données indiquent l'exactitude de classification basée sur les éléments chimiques Mg, P, S, K, Cl et Na identifiés dans les écailles de morues.

Zones d'origine	Nombre d'individus échantillonnés	Prédiction d'appartenance aux zones			Succès de classification total (%)
		Sud-ouest Terre-Neuve (C)	Nord-est du Golfe (B)	Anticosti (A)	
Sud-ouest de Terre-Neuve (C)	229	160 (70 %)	37 (16 %)	32 (14 %)	
Nord-est du Golfe (B)	231	44 (19 %)	164 (71 %)	23 (10 %)	
Anticosti (A)	105	13 (12,5 %)	13 (12,5 %)	79 (75 %)	
Total des individus	565	217	214	134	71 %

La plus faible séparation entre les individus du sud-ouest de Terre-Neuve et ceux du nord-est du golfe indique la présence d'un mélange entre ces zones, puisqu'environ 20% des individus de chaque région sont classés dans leur zone voisine (Tableau 5), ceci peut aussi indiquer que les environnements entre certaines zones sont similaires.

Les variables apportant le plus de discrimination entre les zones sont déterminées en examinant la valeur du « *F to remove* » qui indique la signification statistique de chaque variable dans la discrimination entre les groupes. Les éléments les plus significatifs sont K ($F = 114,02$), Cl ($F = 37,98$) et Mg ($F = 27,57$). En ce qui concerne P, cet élément semble apporter le moins de discrimination dans le modèle ($F = 1,89$). Si on enlève cet élément dans l'analyse discriminante, le succès de classification total reste inchangé (71%). Les similarités entre les groupes sont déterminées en examinant la valeur « between groups *F*-matrix » qui utilise la distance de Mahalanobis (D^2) pour calculer la distance entre les centroïdes des groupes. Les groupes qui se différencient le plus sont la région B et la région A ($F = 48,075$), la région A est la plus significativement discriminée par rapport aux deux autres régions.

1.3. Analyse des individus du nord du golfe du Saint-Laurent et du sud de Terre-Neuve (échantillonnages d'été et d'automne)

En analysant les régions 3Pn automne et 3Ps avec les régions A, B et C, l'ANOVA indique que les concentrations des sept éléments diffèrent significativement en fonction de ces zones (ANOVA, ddl = 4, $P < 0,001$) et la MANOVA indique une variation significative des signatures entre les zones (Wilk's Lambda = 0,639; $P < 0,0001$). D'après la CDA prenant en compte les cinq sites de l'étude (Fig.9), la discrimination de la région A est encore plus nette (76%) (Tableau 6) que lors de l'analyse discriminante précédente. Par contre, les régions B et C semblent moins bien discriminées, soit à 65 et 42 % (Tableau 5) contre 70 et 71% précédemment (Tableau 5). Les éléments contribuant le plus significativement pour la discrimination des zones sont K ($F = 58,83$) et Cl ($F = 41,13$). Les régions les plus significativement différentes sont 3Pn

en automne et la région A ($F = 48,27$), la région A est la plus différente. La possibilité de mélange évoquée plus haut semble plus marquée ici. L'analyse fait ressortir un faible mélange entre la composante d'Anticosti et les deux zones du sud de Terre-Neuve.

Tableau 6. Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed).

Zones	Nombre d'individus échantillonnés	Prédiction d'appartenance aux zones					
		S-O de Terre-Neuve (C)	Nord-Est du Golfe (B)	Anticosti A	3Pn automne	3Ps	
S-O de Terre-Neuve (C)	229	97 (42 %)	22 (10 %)	33 (14 %)	39 (17 %)	38 (17 %)	Succès de classification total (%)
Nord-Est du Golfe (B)	231	22 (10 %)	150 (65 %)	24 (10 %)	18 (8 %)	17 (7 %)	
Anticosti (A)	105	8 (8 %)	10 (9 %)	80 (76 %)	4 (4 %)	3 (3 %)	
3Pn automne	76	5 (7 %)	6 (8 %)	0 (0 %)	48 (63 %)	17 (22 %)	
3Ps	59	3 (5 %)	2 (3 %)	0 (0 %)	14 (24 %)	40 (68 %)	
Total des individus	700	135	190	137	123	115	59 %

Canonical Means Plot

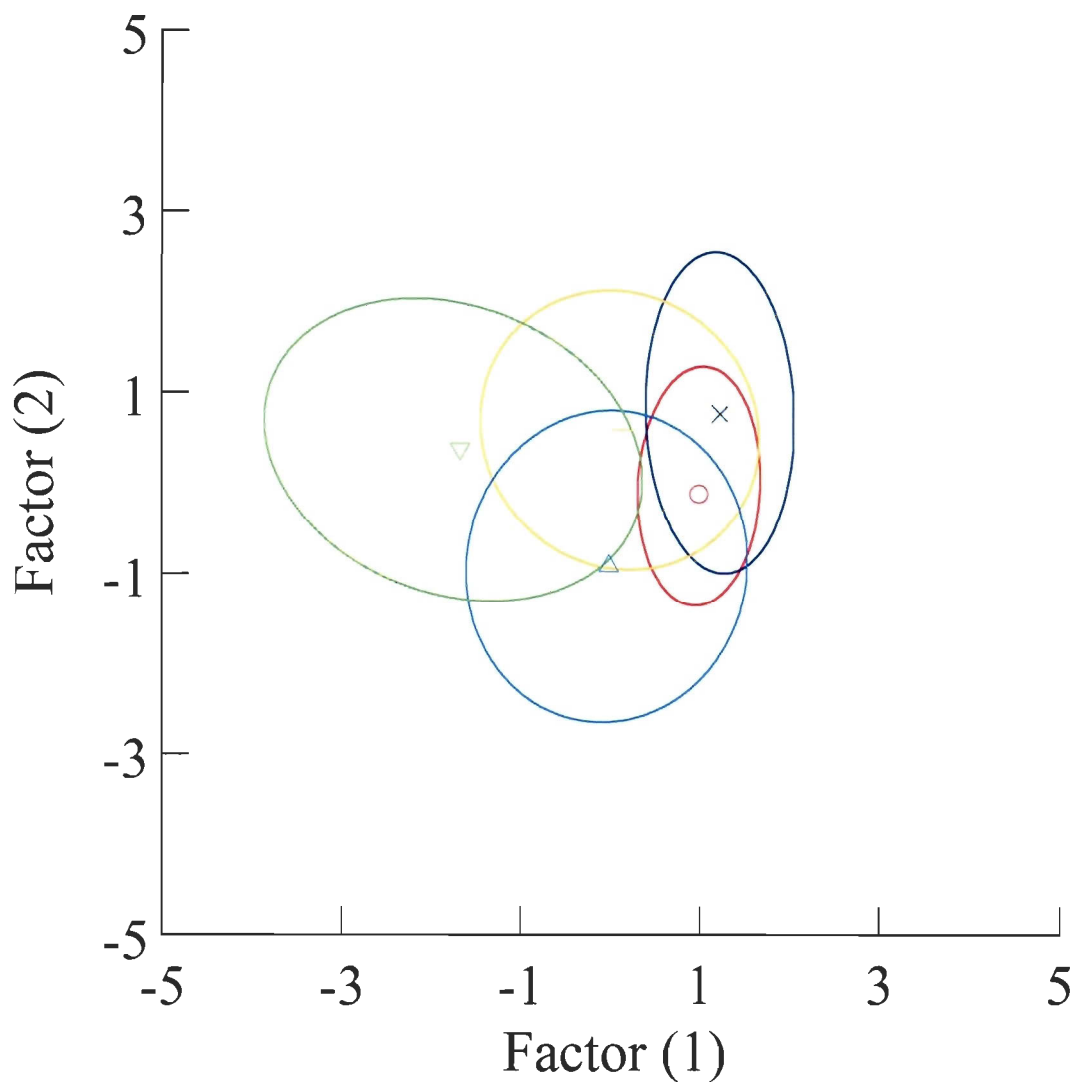


Fig. 9. Empreinte chimique des écailles (variables standardisées avec la taille) de morues appartenant au stock du nord du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante. Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75 %. Des échantillons venant de la région d'Anticosti (A, ∇), région du nord-est du golfe (B, \triangle), de la région du sud-ouest de Terre-Neuve (C, $+$), 3Ps (\times) et un échantillonnage en 3Pn ayant eu lieu en automne (\circ).

En vue de déterminer la composition précise de la zone de mélange 3Pnaut, les zones d'été et d'hiver ont été traitées à part. Les zones d'été (région A, région B, région C, aut, 3Ps) ont été traitées comme zones de référence alors que les individus échantillonnés en 3Pn durant l'automne (3Pn aut) sont alors considérés comme des individus provenant de régions inconnues (Campana *et al.*, 2007). Les individus d'hiver (3Pn aut) ont été ajoutés par-dessus les résultats de la CDA pour les zones d'été (utilisant la CDA avec seulement les zones d'été comme référence) (Fig 10). Tous les individus échantillonnés en hiver chevauchent les groupes d'été, ceci signifie que la source des individus de 3Pn aut provient des individus des groupes d'été se trouvant en 3Pn aut durant l'hiver.

Pour connaître la composition précise de cette zone de mélange (3Pn aut) en fonction des individus appartenant aux groupes d'été (populations de référence), on utilise l'empreinte chimique des individus d'été comme référence pour estimer la proportion des individus de chaque groupe dans la zone 3Pn aut (population inconnue). On analyse dans une CDA (avec échantillon d'été comme référence) les individus échantillonnés en 3Pn durant l'automne comme étant des individus appartenant à des groupes inconnus et on observe le pourcentage d'individus de 3Pn aut qui se classifient correctement avec les groupes d'été. On observe que 35 % des individus en 3Pn aut s'identifient à 3PS, 30 % à la région C, 26 % à la région B et 9 % à la région d'Anticosti. Ceci permet de voir que cette région est bien une zone de mélange présentant toutes les zones de l'étude.

Canonical Means Plot

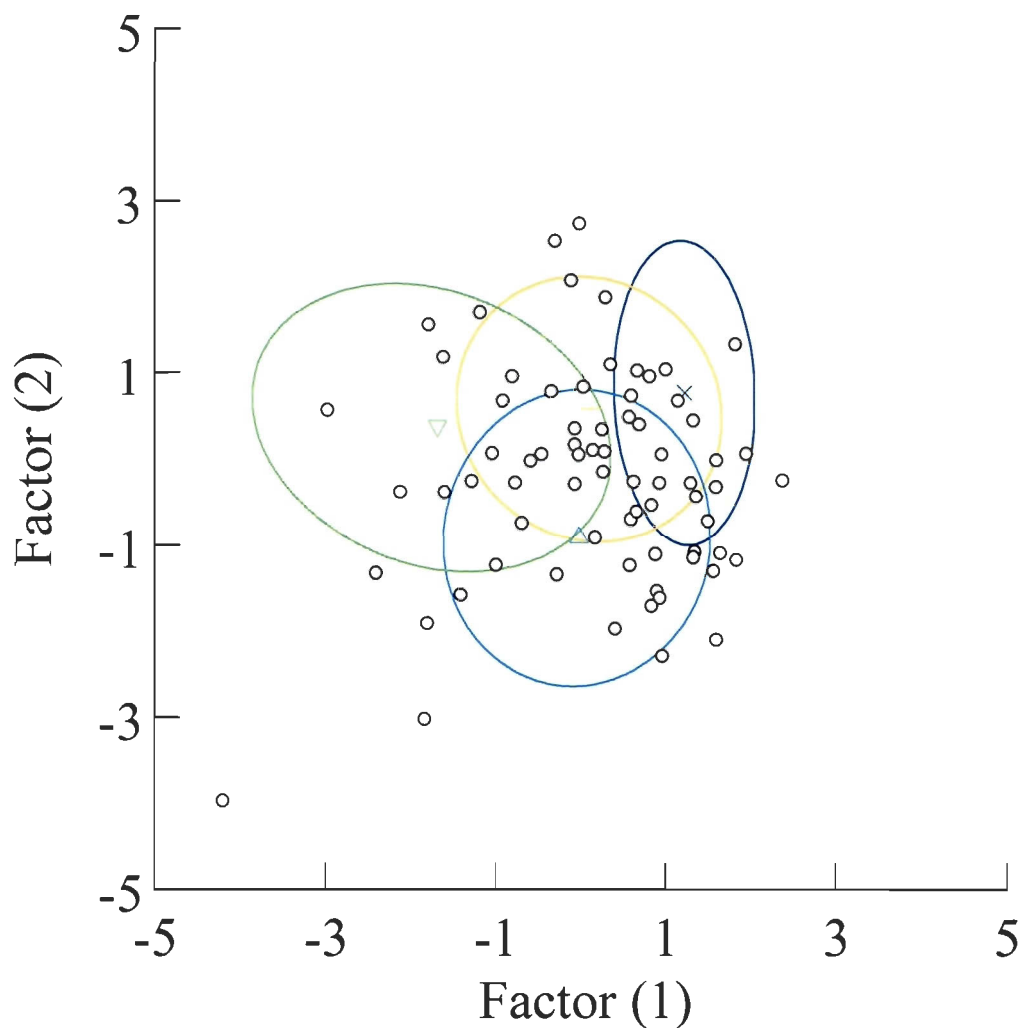


Fig. 10. Empreinte chimique des écailles (variables standardisées avec la taille) de morues appartenant au stock du nord du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante. Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75%. Des échantillons venant de la région d'Anticosti (A, ∇), région du nord-est du golfe (B, \triangle), de la région du sud-ouest de Terre-Neuve (C, $+$), 3Ps (\times) avec ajout de l'échantillonnage en 3Pn aut juste tracé par-dessus l'analyse ().

1.4. Analyse de la composante A (Anticosti) avec le sud-ouest de Terre-Neuve (échantillonnages d'été et d'automne)

Une analyse canonique discriminante impliquant la région A, 3Pn automne et 3Ps basée sur les sept éléments chimiques trouvés dans les écailles (ANOVA, ddl = 2, $P < 0,001$; MANOVA, Wilk's Lambda = 0,613 ; $P < 0,0001$) met clairement en évidence la discrimination de la zone d'Anticosti (Fig. 11) avec un succès de classification de 85 % (Tableau 7). Le total de dispersion expliqué par l'axe canonique 1 s'élève à 86,4 % ce qui indique très nettement la séparation des individus du site d'Anticosti à ceux des deux autres sites. Les éléments les plus significatifs sont Cl ($F = 45,69$) et Mg ($F = 16,9$) et les moins significatifs sont Ca ($F = 1,46$) et Na ($F = 1,45$). Si on enlève ces éléments dans l'analyse discriminante, le succès de classification pour la composante A passe à 88 %. La région la plus différente est la région A avec une différence significative entre les composantes A et 3Ps ($F = 49,13$). Cette analyse supplémentaire appuie la discrimination de la composante d'Anticosti et soulève une question concernant le faible mélange des individus d'Anticosti avec les autres composantes durant l'automne.

Tableau 7. Résultats de la classification Jackknifed des individus prélevés en été et en automne en fonction des zones A, 3Pn automne et 3Ps (n = 240) selon l'analyse discriminante. Les données indiquent l'exactitude de classification basée sur les éléments chimiques Ca, Mg, P, S, K, Cl et Na identifiés dans les écailles de morues.

Zones d'origine	Nombre d'individus échantillonnés	Prédiction d'appartenance aux zones			Succès de classification total (%)
		3Pn aut	3Ps	Anticosti (A)	
3Pn aut	76	57 (75 %)	19 (25 %)	0 (0 %)	
3Ps	59	17 (29 %)	42 (71 %)	0 (0 %)	
Anticosti	105	13 (12 %)	3 (3 %)	89 (85 %)	
Total des individus	240	87	64	89	78 %

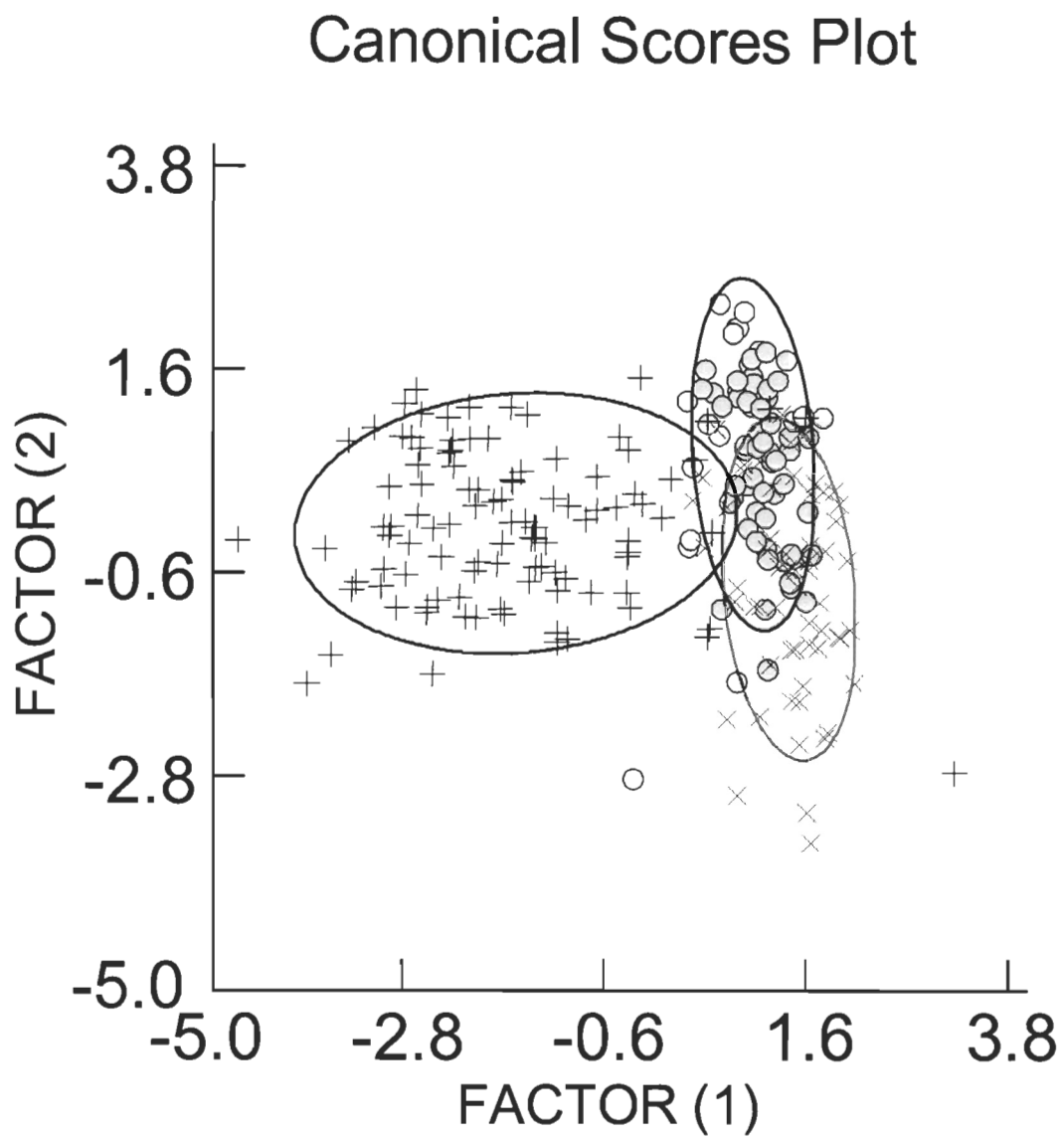


Fig. 11. Résultats de l'analyse discriminante canonique utilisée pour caractériser les différences d'empreintes chimiques (variables standardisées avec la taille) des écailles de morues du stock du nord du golfe du Saint-Laurent entre les échantillons de la région A du golfe (Anticosti, $+$), de 3Pn automne (\circ) et de 3Ps (\times).

1.5. Discrimination entre les zones du nord et du sud du golfe du Saint-Laurent (échantillonnage d'été, régions A, B, C et 4T)

Dans le but de confirmer la présence d'une empreinte chimique différente entre le nord et le sud du golfe, des individus du sud du golfe du Saint-Laurent (4T) sont pris en compte dans l'analyse. L'ANOVA indique que les signatures chimiques des écailles varient significativement en fonction des zones (ANOVA, $P < 0,001$) excepté pour le calcium (ANOVA, $P > 0,001$) (Tableau 8) et l'analyse multivariée montre une différence significative parmi les zones (MANOVA, Wilk's Lambda = 0,264; $P < 0,001$).

Tableau 8. Analyse de variance à sept facteurs sans répétition comparant l'influence des éléments chimiques (variables standardisées avec la taille) par rapport aux trois zones principales de l'étude et la région du sud du golfe (A, B, C et 4T) ($n = 583$).

Variables dépendantes	Somme des carrés	ddl = 3	
		F	P (erreur α)
Na	1,973	17,676	$P < 0,0001$
Mg	20,487	95,818	$P < 0,0001$
P	321,063	11,482	$P < 0,0001$
S	4,684	20,727	$P < 0,0001$
K	21,380	74,301	$P < 0,0001$
Cl	20,705	42,626	$P < 0,0001$
Ca	186,764	2,257	0,081

L'analyse discriminante canonique (CDA) fondée sur un modèle comportant les six éléments chimiques significatifs montre une séparation très marquée entre les régions du nord du golfe (A, B et C) et les individus du sud (Fig. 12). La matrice Jackknifed (Tableau 9) indique une classification correcte de plus de 70% pour l'ensemble des régions. Elle est de 69% pour le sud-ouest de Terre-Neuve (région C), 71 % pour le nord-est du golfe (région B), 76 % pour le secteur de l'île d'Anticosti (région A) et de 83 % pour le sud du golfe. L'axe canonique 1 explique 93% de la dispersion totale, ce qui indique très nettement la séparation des individus du nord et du sud du golfe du Saint-Laurent. Les éléments apportant le plus de signification dans la discrimination des zones sont K ($F = 102,74$) et Mg ($F = 49,74$). Les régions les plus significativement différentes sont les composantes B et 4T ($F = 64,12$).

Tableau 9. Résultats de la classification Jackknifed des individus prélevés en été en fonction des zones (n = 583) selon l'analyse discriminante. Les données indiquent l'exactitude de classification basée sur les éléments chimiques Mg, P, S, K, Cl et Na identifiés dans les écailles de morues.

Zones d'origine	Nombre échantillons	Prédiction d'appartenance aux zones				Succès de classification total (%)
		Sud-ouest Terre-Neuve (C)	Nord-est du Golfe (B)	Sud du golfe 4T	Anticosti (A)	
Sud-ouest de Terre-Neuve (C)	229	159 (69 %)	36 (16 %)	2 (1 %)	32 (14 %)	
Nord-est du Golfe (B)	231	41 (18 %)	164 (71 %)	2 (1 %)	24 (10 %)	
Sud du golfe 4T	18	3 (17 %)	0 (0 %)	15 (83 %)	0 (0 %)	
Anticosti (A)	105	11 (11 %)	12 (11 %)	2 (2 %)	80 (76 %)	
Total des individus	583	214	212	21	136	72 %

Canonical Means Plot

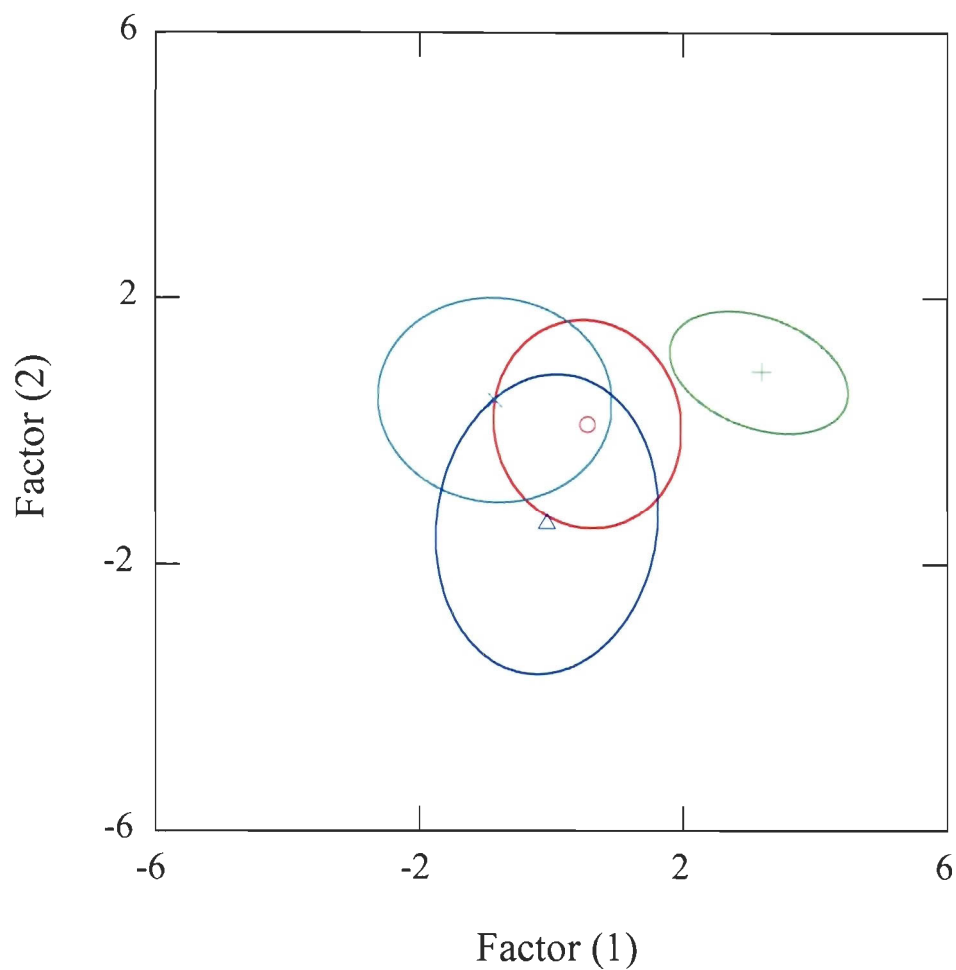


Fig. 12. Empreinte chimique des écailles (variables standardisées avec la taille) de morues appartenant au stock du nord du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante. Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75 %. Des échantillons venant de la région A (\triangle), région B (\times), de la région C (\circ) et un échantillonnage dans le stock du sud du golfe du Saint-Laurent en 4T ($+$).

1.6. Analyse des individus du nord et du sud du golfe du Saint-Laurent et les individus du sud de Terre-Neuve (échantillonnages d'été et d'automne)

L'analyse de toutes les régions de l'étude, c'est-à-dire les zones du nord et du sud du golfe mais aussi les régions 3Pn automne et 3Ps est effectuée en vue de vérifier si la séparation de 4T observée précédemment est toujours bien marquée. L'ANOVA indique que les concentrations des sept éléments diffèrent significativement en fonction de ces zones (ANOVA, ddl = 5, $P < 0,001$).

D'après la CDA (Fig.13), la discrimination de la région du sud du golfe est toujours bien présente avec l'existence d'un mélange possible avec la zone 3Ps (Tableau 10). Cette dernière analyse confirme la présence d'empreintes chimiques différentes entre les individus du nord et du sud du golfe du Saint-Laurent et le mélange faible. Les variables les plus discriminantes sont K ($F = 62,50$) et Cl ($F = 41,60$).

L'ajout de la composante 4T dans la CDA propose une analyse discriminante différente de celle obtenue précédemment (Fig 9). Ceci s'observe aussi dans les matrices de classification Jackknifed (Tableau 6 et 10). 4T est la région la plus significativement différente de l'analyse ($F = 60,81$; $F = 56,04$) et les composantes 3Pn aut et 3Ps sont les moins différentes ($F = 12,03$).

Tableau 10. Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed).

Zones	Nombre d'échantillons	Prédiction d'appartenance aux zones						
		3Pn aut	3Ps	SO Terre-Neuve (C)	Nord-est Golfe (B)	Sud du golfe (4T)	Anticosti (A)	
3Pn aut	76	48 (63 %)	17 (22 %)	5 (7 %)	6 (8 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	Succès de classification total (%)
3Ps	59	14 (24 %)	40 (68 %)	3 (5 %)	2 (3 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	
Sud-ouest Terre-Neuve (C)	229	38 (17 %)	37 (16 %)	99 (43 %)	20 (9 %)	2 (1 %)	33 (14 %)	
Nord-est du Golfe (B)	231	16 (7 %)	17 (7 %)	23 (10 %)	148 (64 %)	2 (1 %)	25 (11 %)	
Sud du golfe (4T)	18	1 (5,5 %)	3 (17%)	1 (5,5 %)	0 (0 %)	13 (72 %)	0 (0 %)	
Anticosti (A)	105	2 (2 %)	3 (3 %)	8 (8 %)	10 (9 %)	2 (2 %)	80 (76 %)	60 %
Total des individus	718	119	117	139	186	19	138	

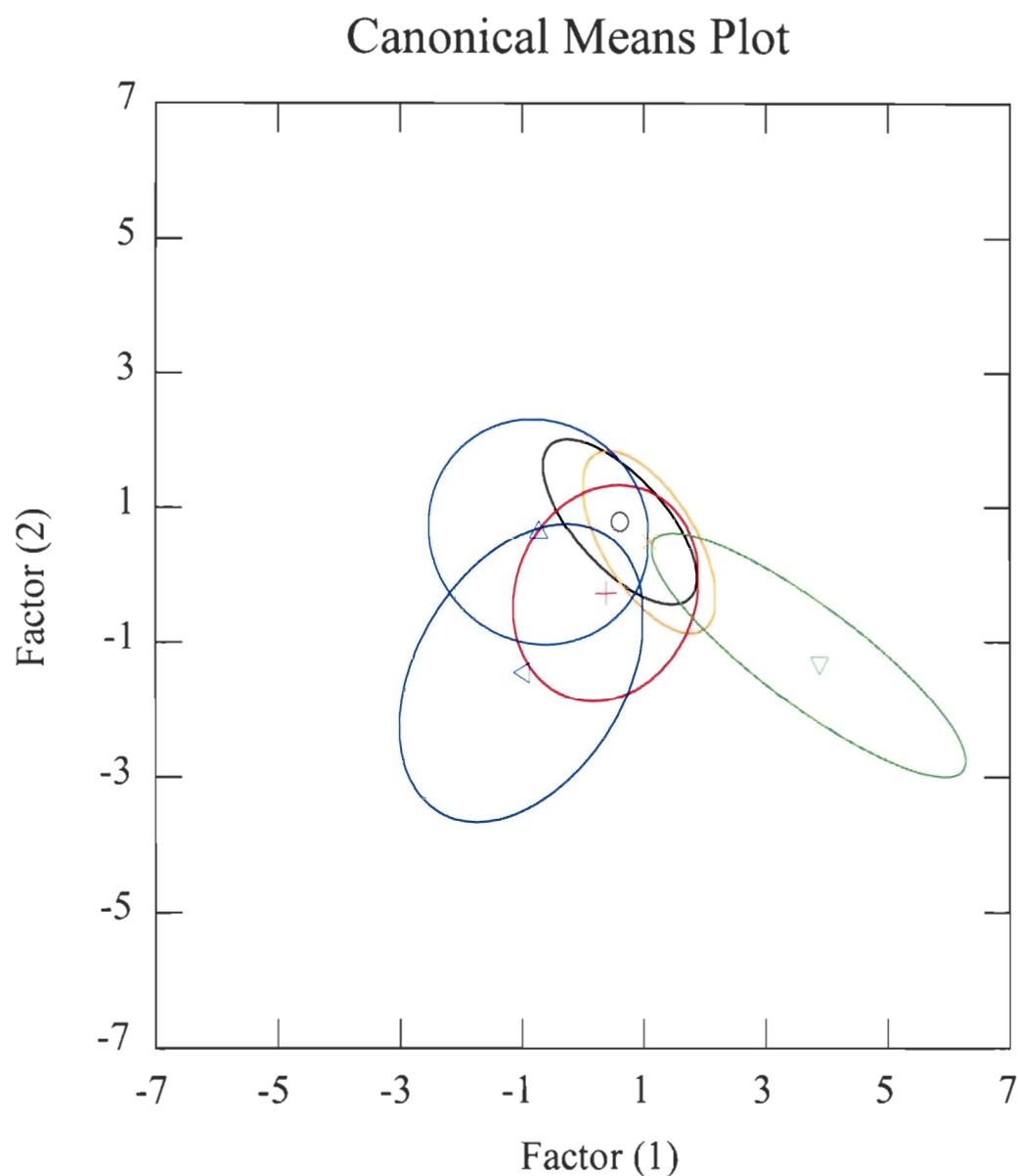


Fig. 13. Empreinte chimique des écailles (variables standardisées avec la taille) de morues appartenant au stock du nord et du sud du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante. Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75 %. Des échantillons venant de la région A (△), région B (△), de la région C (+), 3Ps (○), 3Pn ayant eu lieu en automne (○) et un échantillonnage dans le stock du sud du golfe du Saint-Laurent en 4T (▽).

CHAPITRE 3 - RÉSULTATS CONCERNANT LES VERTÈBRES

1. Discrimination des composantes du stock de morue du nord du golfe du Saint-Laurent à l'aide de la chimie des vertèbres

1.1. Empreinte chimique des vertèbres

Un total de cinq éléments chimiques (Mg, P, Ca, Na et S) a été déterminé dans le premier annuli des vertèbres. Les éléments chimiques comme le chlore et le potassium (Cl et K) ont été observés de manière trop aléatoire dans l'analyse pour être pris en compte et ont été exclus des analyses. Il existe des différences de concentration moyenne des éléments chimiques (Tableau 11). De tous les éléments recueillis, le calcium (Ca) et le potassium (P) ont les concentrations les plus élevées, alors que le magnésium (Mg) apparaît comme l'élément avec les plus faibles concentrations. Le calcium (Ca) présente des valeurs deux fois plus élevées pour les individus du nord du golfe du Saint-Laurent, comparativement à ceux du sud de Terre-Neuve. Le calcium appartient aux macroconstituants des structures calcifiées (Carlström, 1963), ce qui explique les concentrations plus importantes de cet élément. Le manque de précision dans la détermination de potassium (K) et chlore (Cl) provient du fait qu'ils font partie des microconstituants (Thresher *et al.*, 1994) donc moins facilement perceptibles en raison de la limite de détection du SEM-ED.

Tableau 11. Moyennes et écarts-types des concentrations des éléments chimiques présents dans les vertèbres de morues (*Gadus morhua*). Les concentrations sont données en pourcentage de poids \pm écart type.

Éléments	Anticosti (A)	Nord-est du Golfe (B)	Sud-ouest de Terre-Neuve (C)	3Pn automne	3Ps
Na	0,18 \pm 0,12	0,25 \pm 0,16	0,23 \pm 0,17	0,32 \pm 0,14	0,32 \pm 0,16
Mg	0,16 \pm 0,09	0,14 \pm 0,09	0,16 \pm 0,10	0,14 \pm 0,09	0,12 \pm 0,08
P	5,36 \pm 3,10	4,45 \pm 3,20	4,63 \pm 3,28	2,85 \pm 2,00	3,01 \pm 2,09
S	0,23 \pm 0,14	0,26 \pm 0,13	0,24 \pm 0,14	0,28 \pm 0,16	0,27 \pm 0,14
Ca	9,03 \pm 7,95	7,57 \pm 7,65	7,67 \pm 7,02	5,00 \pm 6,74	4,75 \pm 3,66

Une analyse de covariance (ANCOVA) a été utilisée pour déterminer l'influence de la taille des individus sur les concentrations des éléments retrouvés dans les vertèbres, avec les éléments chimiques comme variable dépendante et la taille des individus (cm) comme covariable. Les cinq éléments sont corrélés positivement avec la taille (Tableau 12). Pour standardiser les concentrations des éléments chimiques avec la taille, la relation de Bergenius *et al.* (2005) a été utilisée. Les analyses statistiques utiliseront donc uniquement les concentrations des éléments standardisées avec la taille des individus.

Tableau 12. Résultats de l'ANCOVA à un facteur (taille) avec les éléments chimiques comme variables dépendantes (n = 700).

Variables dépendantes	source de variation	Somme des carrés	ddl = 1		Pente ± écart type
			F	P (erreur α)	
Na	Taille (cm)	0,856	67,923	< 0,0001	0,003 ± 0
Mg		0,23	40,007	< 0,0001	-0,001 ± 0
P		10,892	33,78	< 0,0001	-0,010 ± 0,02
S		0,086	7,984	0,005	0,00
Ca		14,031	24,244	< 0,0001	-0,011 ± 0

1.2. Discrimination des zones du nord du golfe du Saint-Laurent (échantillonnage d'été, régions A, B et C)

L'ANOVA sans répétition, avec les concentrations en éléments chimiques comme variables dépendantes (cinq facteurs) et trois les zones de l'étude (Anticosti = A, nord-est du golfe = B et sud-est de Terre-Neuve = C) comme variables qualitatives indique que quatre éléments chimiques (Mg, Na, Ca et P) varient significativement en fonction des zones (Tableau 13). Seul S n'apparaît pas comme apportant des informations significatives dans l'étude (Tableau

14). L'analyse de variance multivariée (MANOVA) montre que la différence des empreintes chimiques en fonction des zones est significative (Wilk's Lamda = 0,887; $P < 0,0001$).

Tableau 13. Analyse de variance à cinq facteurs sans répétition comparant l'influence des éléments chimiques par rapport aux trois zones principales de l'étude ($n = 567$).

Variables dépendantes	Somme des carrés	ddl = 2	
		F	P (erreur α)
Na	0,114	8,844	0,000
Mg	0,020	3,361	0,035
P	1,905	5,736	0,003
S	0,018	1,688	0,186
Ca	2,334	3,930	0,020

L'analyse discriminante canonique (CDA) fondée sur un modèle comportant les quatre éléments chimiques significatifs (Mg, Na, Ca et P) ne montre pas clairement de séparation entre les zones A, B et C (Fig. 14). Pour faciliter la compréhension du graphique, la composante du sud-ouest de Terre-Neuve (C) a été enlevée, car celle-ci se superpose complètement aux deux autres zones. Cette représentation ne permet pas de raffiner la discrimination entre les composantes A et B et il existe un mélange important entre ces deux zones. La composante canonique 1 explique 31,3 % de la discrimination entre les deux zones. La composante canonique 2 n'apporte aucune explication pour la discrimination entre les zones. D'après le « *F to remove* », qui indique la signification statistique d'une variable dans la discrimination entre les groupes, les variables apportant le plus de discrimination dans cette études sont Na ($F = 24,19$) et Mg ($F =$

6,15). Les zones les plus significativement différentes sont la région B et la région A ($F = 15,24$). La matrice de classification Jackknifed est dans ce cas, plus utile que la représentation graphique pour mieux appréhender ce qu'il se passe au niveau de ces zones (Tableau 14). Le taux de classification total des individus dans leurs zones respectives est assez faible ($< 50 \%$). La composante du site A possède le plus fort taux de classification (62 %), alors que les deux autres composantes, nord-est du golfe (48 %) et sud-ouest de Terre-Neuve (34 %) ont des taux vraiment bas montrant une faible réussite de classification de ces individus dans leurs zones respectives. Ces deux sites, B et C présentent presque la moitié de leurs individus classés dans la zone voisine (Tableau 14).

Tableau 14. Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed). Les données indiquent l'exactitude de classification basée sur les éléments chimiques Mg, Na, Ca et P identifiés dans les vertèbres de morues.

zones	Nombre d'échantillons	Prédiction d'appartenance aux zones			Succès de classification total (%)
		Sud-ouest de Terre-Neuve (C)	Nord-est du Golfe (B)	Anticosti A	
Sud-ouest de Terre-Neuve (C)	211	71 (34 %)	78 (37 %)	62 (29 %)	
Nord-est du Golfe (B)	224	60 (27 %)	108 (48 %)	56 (25 %)	
Anticosti (A)	132	29 (22 %)	21 (16 %)	82 (62 %)	
Total	567	160	207	200	46 %

Canonical Scores Plot

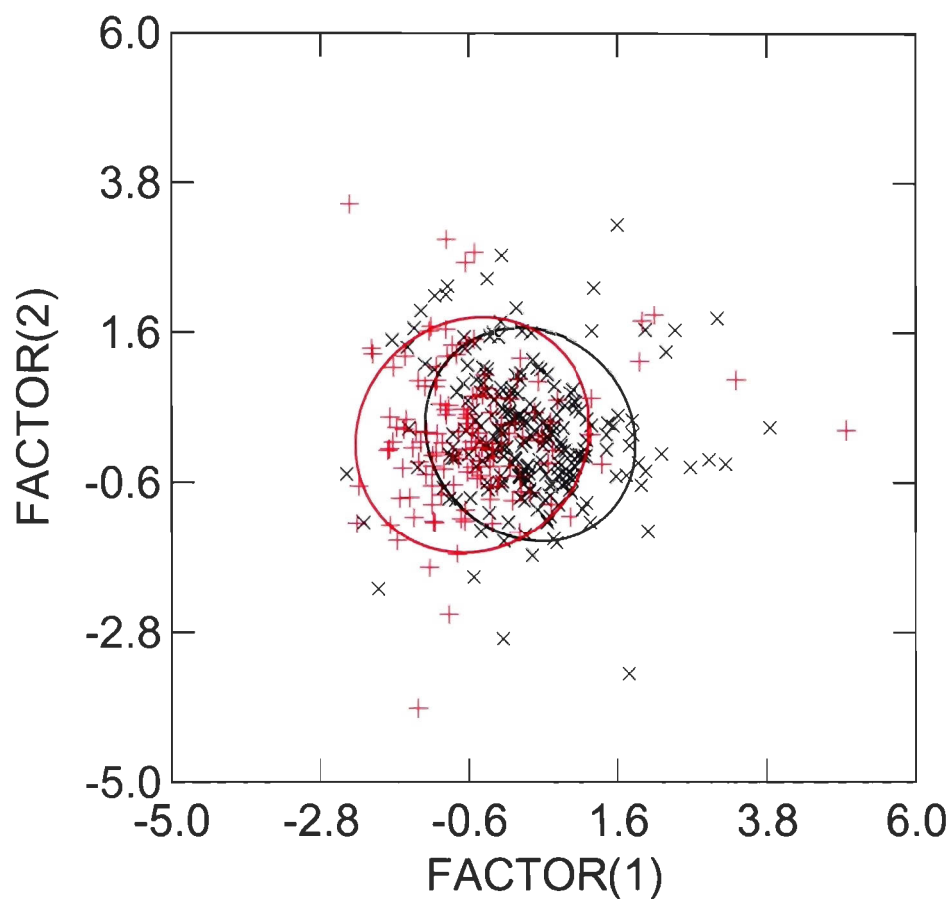


Fig. 14. Résultats de l'analyse discriminante canonique pour caractériser les différences d'empreintes chimiques des vertèbres (variables standardisées avec la taille) de morues du nord du golfe du Saint-Laurent entre les échantillons du site A (Anticosti $+$), des individus du site B (nord-est du golfe \times).

1.3. Analyse des individus du golfe du Saint-Laurent et du sud de Terre-Neuve (échantillonnages d'été et d'automne)

L'analyse de variance (ANOVA) (Tableau 15) prenant en compte les sites A, B, C, 3Pn automne et 3Ps indique que les concentrations de tous les éléments diffèrent significativement en fonction des zones définies (ANOVA, $P < 0,01$; Mg et S, $P < 0,05$). La MANOVA montre une différence significative des empreintes chimiques en fonction des zones (Wilk's Lambda = 0,710; $P < 0,0001$).

D'après l'analyse canonique discriminante (CDA) (Fig. 15), la discrimination de la zone A (Anticosti) est plus nette (65%) que dans l'analyse précédente (Tableau 16). Ajouter les composantes 3Ps et 3Pn automne dans l'analyse favorise la discrimination de la sous-population qui se situe au niveau du site A durant l'été. Par contre, les autres zones de l'étude ne sont pas discriminées de manière importante. On retrouve les individus du site B et C qui se superposent complètement (Fig.15). L'ajout des composantes du sud ne favorise pas une meilleure discrimination pour ces individus (B et C). On observe un mélange important entre les composantes 3Pn d'automne et 3Ps. Na ($F = 36,91$) est la variable apportant le plus de discrimination pour l'analyse. Les composantes les plus significativement différentes sont la composante A et 3Pn aut ($f = 38,00$) et les moins différentes sont 3Pn aut et 3Ps ($F = 0,923$), dans l'analyse, c'est la composante A la plus différente.

Tableau 15. Analyse de variance comparant l'influence des éléments chimiques par rapport aux zones d'études (n = 700).

Variables dépendantes	Somme des carrés	ddl = 4	
		F	P (erreur α)
Na	0,828	16,528	< 0,0001
Mg	0,072	3,178	0,0130
P	4,149	12,937	< 0,0001
S	0,026	2,440	0,0460
Ca	5,405	9,390	< 0,0001

Tableau 16. Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed).

zones	Nombre échantillons	Prédiction d'appartenance aux zones					
		3Pn	3Ps	Sud-ouest de Terre-Neuve (C)	Nord-est du Golfe (B)	Anticosti (A)	
3Pn	76	37 (49 %)	22 (29 %)	9 (12 %)	5 (6 %)	3 (4 %)	Succès de classification total (%)
3Ps	57	21 (37 %)	25 (44 %)	3 (5 %)	7 (12 %)	1 (2 %)	
Sud-ouest de Terre-Neuve (C)	211	23 (11 %)	22 (11 %)	58 (27 %)	44 (21 %)	64 (30 %)	
Nord-est du Golfe (B)	224	30 (13 %)	28 (13 %)	50 (22 %)	70 (31 %)	46 (21 %)	
Anticosti (A)	132	5 (4 %)	7 (5 %)	21 (16 %)	13 (10 %)	86 (65 %)	
Total	700	116	104	141	139	200	39 %

Canonical Means Plot

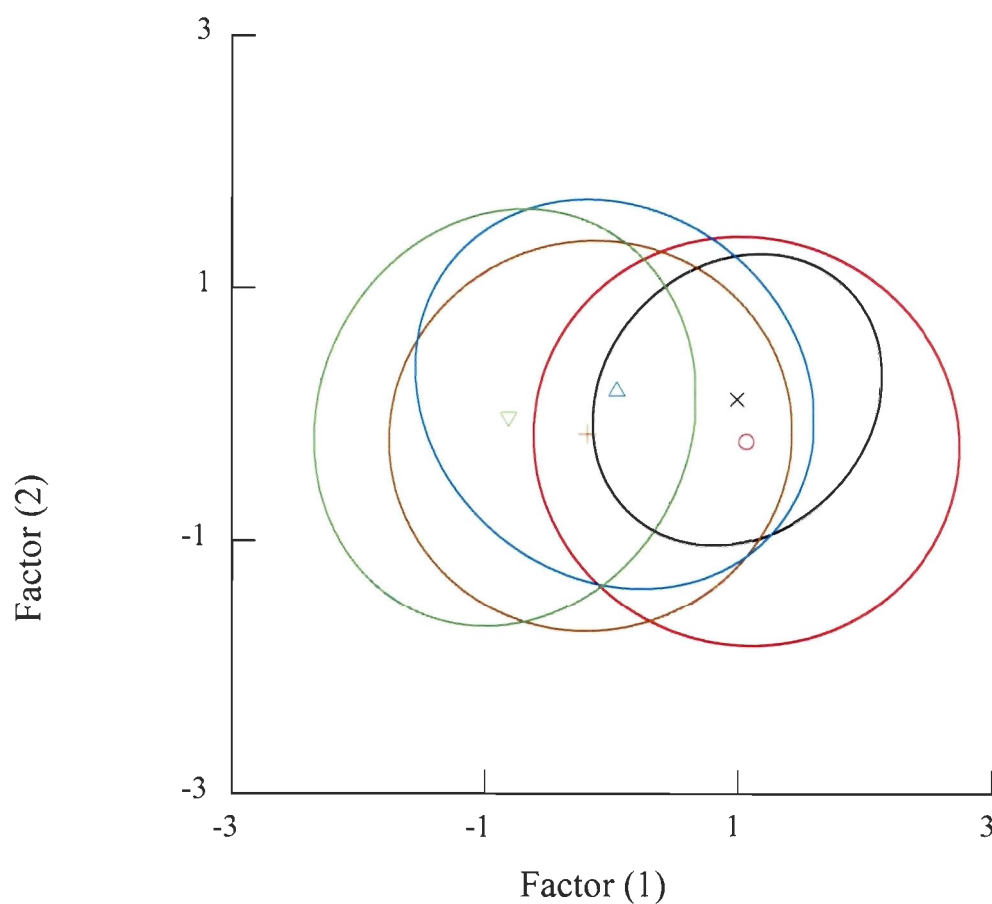


Fig. 15. Empreinte chimique des vertèbres de morues du stock du nord du golfe du Saint-Laurent basée sur une analyse canonique discriminante (variables standardisées avec la taille). Les échantillons viennent des sites dont la moyenne est représentée par le symbole au centre des ellipses et la disposition autour des ellipses est de 75 %. Sites d'échantillonnage : A (∇), B (\triangle), C ($+$), 3Ps (\times) et 3Pn automne (\odot).

1.4. Analyse de la particularité de la composante A (Anticosti)

D'après les autres CDA (Fig. 14, Fig. 15) on observe une discrimination plus poussée pour la composante A par rapport aux autres composantes de l'étude (B, C, 3Ps et 3Pn automne). Une analyse canonique discriminante a été effectuée en prenant en compte toutes les variables déterminées au niveau des vertèbres (Tableau 17), basée sur la composante A et des deux composantes du sud de Terre-Neuve (3Pn et 3Ps) (Fig. 16). L'analyse multivariée (MANOVA) montre une différence des empreintes chimiques en fonction des zones analysées (Wilk's Lambda = 0,481 ; $P < 0,0001$). La composante A est la plus différente des trois zones ($F = 42,11$ et $F = 25,80$).

Tableau 17. Analyse de variance comparant l'influence des éléments chimiques par rapport à la composante A et les zones du sud de Terre-Neuve.

Variables dépendantes	Somme des carrés	ddl = 2	
		F	P (erreur α)
Na	0,390	40,036	< 0,0001
Mg	0,024	4,820	0,0090
P	8,005	29,839	< 0,0001
S	0,044	4,009	0,0190
Ca	10,448	20,948	< 0,0001

La CDA apporte beaucoup d'informations dans ce cas (Fig. 16), avec l'observation d'une importante discrimination de la composante du site A par rapport aux deux autres zones, et aussi la mise en avant du mélange, déjà mentionné précédemment, entre les individus de 3Ps qui vont se mélanger en 3Pn durant l'hiver. Environ 50% des individus de 3Ps se retrouvent dans la composante 3Pn durant l'hiver, ceci appuie la présence d'un mélange important entre ces deux zones et expliquent les problèmes de classifications survenus dans l'étude, les mélanges faisant diminuer le taux de classification des autres composantes. Le facteur canonique 1 apporte le plus de discrimination entre les zones, le total de dispersion s'élevant à 71,5 %. Cette variable explique très nettement la séparation des individus du site A à ceux des sites 3Ps et 3Pn automne. En ce qui concerne les variables, Ca semble apporter le moins d'information ($F = 0,30$) pour la discrimination des zones et Na apporte le plus de discrimination ($F = 56,57$). En regardant la matrice de classification Jackknifed (Tableau 18), on voit plus clairement la discrimination de la zone A, avec un succès de classification de 83 %. Ce taux de classification est très élevé, apportant des informations significatives quant à la discrimination de la zone A du golfe du Saint-Laurent par rapport aux individus du sud de Terre-Neuve. Cette analyse supplémentaire centrée sur la composante d'Anticosti, appuie la discrimination de cette composante et soulève une question concernant le faible mélange des individus d'Anticosti avec les autres composantes durant l'automne et donc l'hiver.

Tableau 18. Résultats de la classification des individus en fonction des zones en utilisant une analyse discriminante (déterminée par une matrice Jackknifed).

zones	Nombre d'échantillons	Prédiction d'appartenance aux zones			Succès de classification total (%)
		3Pn	3Ps	Anticosti (A)	
3Pn	76	41 (54 %)	26 (34 %)	9 (12 %)	
3Ps	57	24 (42 %)	29 (51 %)	4 (7 %)	
Anticosti (A)	132	10 (8 %)	12 (9 %)	110 (83 %)	
Total	265	75	67	123	68 %

Canonical Scores Plot

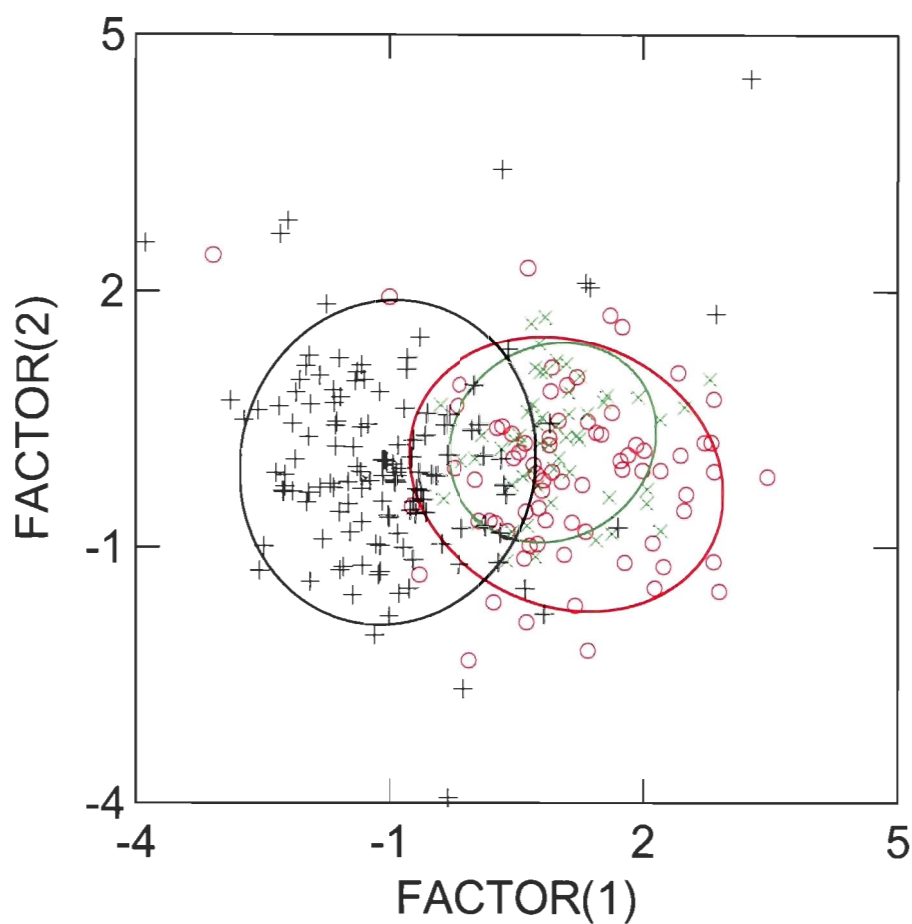


Fig. 16. Résultats de l'analyse discriminante canonique utilisée pour caractériser les différences d'empreintes chimiques des vertèbres (variables standardisées avec la taille) de morues du stock du nord du golfe du Saint-Laurent entre les échantillons du site A (+), des individus de 3Pn automne (◊) et ceux de 3Ps (×).

2. Corrélation entre la chimie des écailles et des vertèbres

Afin d'étudier les relations entre les deux structures calcifiées, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson entre les concentrations des éléments chimiques des écailles et des vertèbres pour les mêmes individus. À part pour le P, aucune corrélation n'est significative : Mg ($r^2 = 0,004$; $P = 0,598$), P ($r^2 = 0,0098$; $P = 0,012$), S ($r^2 = 0,000006$; $P = 0,951$), Ca ($r^2 = 0,0031$; $P = 0,154$), Na ($r^2 = 0,0029$; $P = 0,170$). Les résultats obtenus avec les CDA pour les deux structures montrent que les données recueillies sur les vertèbres apportent beaucoup moins d'informations pour la discrimination des composantes du stock du nord du golfe du Saint-Laurent que les données obtenues sur les écailles. L'empreinte chimique des écailles a permis de classer les individus du nord du golfe du Saint-Laurent à 71 % (Tableau 5), alors que le taux de classification pour ces mêmes individus est de 46 % (Tableau 14) à l'aide de la chimie des vertèbres. Toutefois, malgré la présence de mauvais taux de classification des individus en fonction de leurs zones géographiques respectives, certains résultats des vertèbres sont concordants avec ceux des écailles. La séparation d'Anticosti reste très nette aussi bien avec les données des vertèbres (Fig. 16) qu'avec celle des écailles (Fig. 11) durant l'hiver. En effet, dans les deux cas, le taux de classification du site A par rapport aux secteurs du sud de Terre-Neuve est quasi identique (vertèbres : 83 %; écailles : 85 %). La différence entre les résultats obtenus pour les écailles et les vertèbres peut venir de la zone analysée au niveau des deux structures. Effectivement, le nucleus a été ciblé pour les écailles alors que pour les vertèbres l'étude est fondée sur l'empreinte chimique déterminée au niveau du 1^{er} annuli. La différence observée peut être en rapport avec la différence des zones d'analyse: dans un cas, le nucleus correspond à l'environnement dans lequel les individus se sont développés après leur naissance alors que le 1^{er} annuli correspond à la fin de la première année de l'individu.

DISCUSSION

En vue de mieux comprendre la structure du stock de morue du nord du golfe du Saint-Laurent (3Pn4RS), l'étude avait pour but de déterminer l'empreinte chimique des écailles et des vertèbres de morue (*Gadus morhua*) à l'aide d'un microscope électronique à balayage muni d'un système à énergie dispersive (SEM-ED).

La composition chimique du nucleus des écailles, utilisée comme empreinte naturelle, montre qu'elle est un bon indicateur dans la discrimination des sous-populations du stock du nord du golfe du Saint-Laurent. En effet, les empreintes chimiques des individus sont différentes selon leur zone de capture, chaque zone géographique étant décrite par une empreinte chimique particulière.

L'analyse discriminante complète apporte une bonne séparation des morues entre les individus des zones du nord-est du golfe (B), de la région d'Anticosti (A) et du sud-ouest de Terre-Neuve (C) (Fig. 8), avec un succès de classification des individus dans leurs zones respectives $\geq 70\%$, ce qui justifie de séparer la population du nord du golfe en trois composantes. Les taux de classification de cette étude sont comparables aux résultats obtenus dans d'autres études utilisant la chimie des otolithes. Campana *et al.* (1995), obtiennent des taux de classification compris entre 61-70% pour discriminer des populations adjacentes de morue (*Gadus morhua*) dans le stock de 4T4Vn. Une étude sur deux espèces de poissons provenant d'Atlantique et de Méditerranée, le rascasse de fond (*Helicolenus dactylopterus*) et le merlu (*Merluccius merluccius*), reclasse les individus dans leurs zones respectives avec des succès de classification de 59-67 % (Swan *et al.*, 2006)

Des études basées sur la chimie des otolithes visant à discriminer les zones de nurseries de la morue d'Islande montrent des taux de classification compris entre 40 et 80 %, considérés

comme significatifs (Jónsdóttir *et al.*, 2006; Petursdóttir *et al.*, 2006). Wells *et al.* (2003), en analysant la chimie des écailles des truites fardées indigènes (*Oncorhynchus clarki lewisi*) reclassent à des taux de 70 % et 75 % les individus dans leurs zones respectives au sein du système des rivières de Coeur d'Alene River en Idaho. Ceci appuie la validité de nos résultats. Les résultats confirment la présence de multiples populations au sein du stock du nord du golfe du Saint-Laurent comme le laissaient supposer les travaux antérieurs (Minet 1976; Templeman 1979; Gascon *et al.*, 1990). De plus, nos résultats appuient la subdivision en trois composantes proposée par Yvelin *et al.* (2005), qui étaient fondée sur des données de marquage. La différence observée au niveau des empreintes chimiques des individus des zones de l'étude signifie que les individus grandissent dans des environnements différents, vivent une partie de leur vie dans des environnements différents, mais on ne peut définir avec certitude si les individus appartiennent à des sous-populations différentes. Pour avoir confirmation de la présence de différentes populations au sein d'un stock des études génétiques sont nécessaires.

Les individus de la région de l'île d'Anticosti sont systématiquement discriminés par rapport à la composante du sud de Terre-Neuve durant l'automne. Les études de marquages laissaient supposer que cette composante pouvait avoir disparu (Yvelin *et al.*, 2005). Le mélange qui apparaît entre les morues de la région 4RS et celles de 3Pn à cette saison n'est pas été observé avec les individus d'Anticosti. On peut mettre en avant plusieurs hypothèses expliquant cette absence de mélange. La première étant que la migration de retour pour ces individus ne s'est pas encore effectuée. La deuxième hypothèse, c'est que les individus ne retournent pas en 3Pn pour l'hiver. Une hypothèse a été émise selon laquelle il serait possible que les individus d'Anticosti représentent un mélange avec la composante 4T du sud du golfe du Saint-Laurent (Yvelin *et al.*, 2005). Toutefois, l'empreinte chimique des morues de la

région 4T est significativement différente de celles du nord du golfe. Notre étude ne permet donc pas d'appuyer cette hypothèse.

Alors que l'analyse de la chimie des écailles a apporté des résultats significatifs, montrant la discrimination de sous-populations au sein du stock 3Pn4RS, l'utilisation de la chimie des vertèbres n'apporte pas beaucoup de renseignements. En effet, l'empreinte chimique de cette structure ne s'est pas avérée aussi intéressante que prévu et la présence de composantes différentes au sein du nord du golfe du Saint-Laurent n'apparaît pas ici de manière significative. La présence d'un faible nombre d'éléments détectés au niveau des vertèbres (Tableau 11) limite la qualité de la détermination de cette empreinte chimique. Dans les résultats des écailles, les éléments apportant le plus de discrimination sont le potassium et le chlore, or ces deux éléments ont été observés de manière trop aléatoire dans les vertèbres pour être pris en compte dans l'étude. Ce manque de détermination d'éléments dans les vertèbres a joué un rôle important sur la diminution de la qualité du modèle. Des études antérieures sur la chimie des vertèbres ont réussi à déterminer un plus grand nombre d'éléments chimiques, en utilisant par exemple la spectrométrie à rayon X (Bendell-Young et Harvey, 1986; Behrens Yamada *et al.*, 1987a). De plus, les éléments présents dans ces études apportent souvent plus d'information quant à l'effet de l'environnement sur ces structures (Thresher *et al.*, 1994), avec la présence de strontium ou encore de zinc et de baryum (Mulligan *et al.*, 1983; Behrens Yamada *et al.*, 1987a), qui ont été détectés ici de manière trop aléatoire pour être pris en compte. Le taux de classification correct des individus de notre étude se situe entre 27 et 65 % (Tableau 16). Il s'agit d'un faible taux de réussite selon des études obtenant des taux de classification entre 80 et 95 % à partir de la composition chimique des vertèbres de saumon (*Oncorhynchus nerka*) (Mulligan *et al.*, 1983). Il est à noter que la composante de l'île d'Anticosti est la seule qui est nettement discriminée lors de l'analyse des vertèbres (Fig. 14), ce qui vient confirmer la particularité des individus de cette zone.

Le faible taux de classification obtenu avec les vertèbres peut être dû à plusieurs facteurs. L'utilisation de la cinquième vertèbre dans l'étude ne semble pas être à l'origine de ce manque de discrimination car Mulligan *et al.* (1983) utilisent aussi bien la quatrième vertèbre qu'une vertèbre caudale pour identifier deux stocks de saumons. Le matériel lui-même n'est pas la source de ces faibles taux car les vertèbres sont utilisées de manière significative dans d'autres travaux (Mulligan *et al.*, 1983; Bendell-Young et Harvey, 1986; Kennedy *et al.*, 2000), même si peu d'études utilisent la chimie des vertèbres pour déterminer la structure des stocks, comparativement à celles utilisant la chimie des otolithes ou des écailles (Belanger *et al.*, 1987; Wells *et al.*, 2000a et b ; Brazner *et al.*, 2004; Méthot *et al.*, 2005). Le manque de discrimination au sein de la structure du stock du nord du golfe du Saint-Laurent ne semble donc pas directement lié au matériel utilisé. Ceci remet donc en cause la technique employée pour établir la chimie des vertèbres. Plusieurs contraintes sont liées à l'utilisation du SEM-ED. Tout d'abord pour une meilleure détection des éléments au sein des structures, le SEM-ED requiert de travailler sur des surfaces planes (Gunn *et al.*, 1992), et la moindre irrégularité du matériel empêche une bonne détermination de la chimie des structures étudiées. Or, dans notre cas, l'obtention de fines tranches de vertèbres n'a apporté aucun résultat satisfaisant puisque les seuls éléments détectés étaient Ca, P et S. L'utilisation de tranches plus épaisses a montré la présence de Mg et Na. Toutefois, ces tranches plus épaisses apportent beaucoup plus d'irrégularité de surface. Le polissage et ponçage de ces structures, comme il est nécessaire d'effectuer pour les otolithes avant une étude au SEM-ED (Kalish, 1989; Gunn *et al.*, 1992), n'a apporté aucune amélioration dans la détection. Les faibles résultats obtenus à l'aide de l'analyse des éléments chimiques des vertèbres par rapport à ceux des écailles peuvent être liés au fait que ce matériel est métaboliquement moins stable. L'avantage de l'utilisation de l'otolithe dans les analyses

d'empreinte chimique, c'est que cette structure n'est pas sujette à la résorption et permet de préserver les enregistrements de l'environnement durant la vie de l'individu (Campana et Thorrold, 2001). Les écailles (Lapi et Mulligan, 1981) et les otolithes (Campana et Thorrold, 2001) sont des tissus relativement inertes, d'un autre côté, les cellules vivantes des tissus osseux sont métaboliquement actives durant la croissance avec possibilité d'un renouvellement du matériel après un long terme (Pollard *et al.*, 1999). Toutefois, Behrens-Yamada *et al.*, (1987b) ont montré que le Sr apparaissait métaboliquement inerte dans les vertèbres de saumon argenté (*Oncorhynchus kisutch*) après incorporation. Le problème pourrait aussi venir d'une mauvaise conduction électrique du matériel, et l'analyse aurait peut-être nécessité d'enduire les vertèbres de carbone pour favoriser la détection des éléments, comme c'est le cas pour l'étude des otolithes (Gunn *et al.*, 1992). La faible classification peut aussi venir de la limite de détection du SEM-ED (Gunn *et al.*, 1992), nous restreignant aux éléments chimiques présents à des concentrations > 1000ppm et ne pouvant, dans notre étude, déterminer des éléments comme le strontium ou le baryum, majoritairement utilisés dans les études de discrimination (Coutant et Chen, 1993; Kraus et Secor, 2004; De Vries *et al.*, 2005; Elsdon et Gillanders, 2006). Cette technique apporte donc moins d'informations pour une bonne classification des individus dans une étude de structure de stock (Lapi et Mulligan, 1981). La limite de détection du SEM-ED est beaucoup plus importante que pour les autres techniques utilisées, et cela a sûrement limité la détermination d'un nombre plus important d'éléments chimiques (Gunn *et al.*, 1992). La faible correspondance observée entre les résultats des écailles et ceux des vertèbres, mais aussi la faible discrimination des zones pour les vertèbres provient sûrement d'un biais en relation avec l'étude du 1^{er} annuli des vertèbres, ceci correspondant à la fin de la première année des individus, or pour les écailles c'est le développement de l'individu qui est étudié. A la fin de leur première année, les individus se situent soit dans le chenal Laurentien soit en 3Pn pour passer l'hiver, donc la composition

chimique déterminée dans l'étude des vertèbres exprime plus probablement la chimie de l'environnement que l'on retrouve en 3Pn durant la période hivernale. Le regroupement des résultats des vertèbres qui ne paraissent pas significatifs explique sûrement l'empreinte chimique enregistrée durant l'hiver, ce qui ne peut être comparable avec l'enregistrement effectué en été quand les individus se séparent en des aires estivales différentes. Malgré les problèmes concernant l'analyse de la chimie des vertèbres à l'aide du SEM-ED, la technique reste capable de mettre en évidence des grandes structures présentant des empreintes chimiques contrastées, comme c'est le cas avec la composante d'Anticosti.

On n'observe pas de corrélation significative entre les compositions chimiques des deux structures utilisées. Un petit nombre d'études se sont penchées sur la possibilité de corréler les éléments retrouvés dans plusieurs structures calcifiées d'un même individu (Gillanders, 2001; Wells *et al.*, 2000b; Wells *et al.*, 2003), mais sans mettre en évidence une corrélation complète entre les écailles et les vertèbres. Seule l'étude de Kennedy *et al.* (2000) montre qu'il n'y a aucune différence significative entre la concentration du strontium dans les otolithes, les écailles et les vertèbres chez le saumon de l'Atlantique (*Salmo salar*). L'absence de relation notée dans notre étude est sûrement liée à la faible détermination d'éléments chimiques dans les vertèbres. Les éléments chimiques retrouvés dans les vertèbres sont moins nombreux que dans les écailles. De plus, Cl et K qui apportent des informations importantes quant à la discrimination à l'aide de la chimie des écailles n'apparaissent que de manière sporadique au niveau des vertèbres et n'ont donc pas pu être utilisés dans l'étude. L'absence ou la présence de ces éléments dans les vertèbres de certains individus est en rapport avec un problème de limite de détection du SEM-ED. Ceci est aussi visible en ce qui concerne le strontium (Sr) au niveau des écailles. Le manque de détection d'éléments vraiment discriminants peut induire une mauvaise classification des individus.

La base de l'utilisation des éléments chimiques trouvés au sein des structures calcifiées est fondée sur le fait que ces éléments reflètent l'environnement précis dans lequel les individus ont séjourné (Behrens Yamada *et al.*, 1979 ; Behrens Yamada et Mulligan, 1982-1987a et b; Wells *et al.*, 2000a et b). Ceci suggère que la présence de différences au sein des empreintes chimiques parmi des individus d'un même stock indique que ces individus passent un moment de l'année dans des masses d'eau différentes (Wells *et al.*, 2000b). Plusieurs facteurs peuvent expliquer la variation de l'empreinte chimique des poissons collectés dans le nord du golfe. Ces facteurs sont la température, la salinité et, plus généralement, la qualité de l'eau. Mais ces facteurs ne sont pas suffisants pour induire cette empreinte chimique. En effet, les facteurs physiologiques, comportementaux et la variabilité individuelle entrent aussi en jeu (Swan *et al.*, 2006). Toutefois les relations entre l'environnement et la physiologie ne sont pas encore bien déterminées (Thresher, 1999).

Beaucoup d'études se sont concentrées sur la comparaison entre la chimie de l'eau et la chimie des structures calcifiées (Bath *et al.*, 2000; Wells *et al.*, 2003; De Pontual *et al.*, 2003). Dans la présente étude, les conditions physico-chimiques n'ont pas été prises en compte durant l'échantillonnage des individus, en conséquence on peut seulement émettre des hypothèses sur l'effet de l'environnement. On note toutefois une certaine concordance entre les composantes identifiées et la grande structure géographique de l'aire d'étude.

Le golfe du Saint-Laurent est une mer semi-fermée (250 000 km), stratifiée avec une topographie et une bathymétrie dominée par le chenal Laurentien, qui le divisent en deux grandes régions biogéographiques. Il est connecté avec l'océan Atlantique par le détroit de Belle-Isle, au nord-est, et le détroit de Cabot au sud-est. Il reçoit des apports considérables

d'eau douce provenant du fleuve Saint-Laurent et des rivières de la Côte Nord du Québec (Koutitonsky et Bugden, 1991). La région nord qui nous concerne peut être grossièrement divisée en trois ensembles. La côte ouest de Terre-Neuve est baignée par une branche sud du courant du Labrador, qui longe la côte vers le nord à partir du détroit de Cabot. C'est une région de downwelling le long de la côte de Terre-Neuve (Fuentes Yacco, 1996). La région de la Côte Nord est baignée par une autre branche du courant de Labrador *via* le détroit de Belle-Isle qui s'écoule vers l'ouest. Cette région est caractérisée par de nombreux apports d'eau douce provenant du Bouclier Canadien et par des remontées d'eau (upwellings côtiers) provoquées par la circulation éolienne. La région de l'île d'Anticosti est plus complexe. Le détroit Jacques-Cartier, au nord de l'île, est le siège de mélanges tidaux importants. Une gyre cyclonique caractérise l'ouest du golfe. Enfin, cette région est influencée par des apports continentaux variés (Appalaches, Bouclier Canadien) et anthropiques. Ces derniers aspects pourraient expliquer la plus grande concentration en chlore retrouvée dans les écailles des individus d'Anticosti (Tableau 2). Ces caractéristiques physico-chimiques font apparaître l'existence de différences environnementales entre les zones pouvant expliquer les différences observées dans les empreintes chimiques, même si la source réelle de ces différences dans la composition chimique du matériel calcifié reste encore inconnue. Des études futures devraient se concentrer sur la corrélation entre les conditions physico-chimiques du golfe du Saint-Laurent en fonction des zones géographiques d'appartenance des sous-populations et l'empreinte chimique du matériel calcifié des morues, en vue de mieux comprendre l'impact de l'environnement.

D'après les succès de classification des écailles obtenus dans cette étude, on voit que plus de 25 % des individus sont identifiés comme appartenant à des zones qui ne leur correspondent pas. Il existe plusieurs explications pour ces mauvaises classifications. Il existe

un mélange au sein du stock du nord du golfe qui a été décrit dans plusieurs études antérieures (Lear, 1988; Campana *et al.*, 1999) et qui semble se confirmer d'après nos résultats. Bérudé et Fréchet (2001) démontrent la présence d'un mélange entre 4RS, 3Pn et 3Ps, confirmé par Yvelin *et al.* (2005) et qui est aussi visible dans nos données (Fig.9). En effet, 24 % des individus échantillonnés dans 3Ps sont classés comme appartenant à 3Pn aut, et 17 % des individus de la composante du sud-ouest du golfe sont classés comme des morues de 3Ps (Tableau 6). Il faut aussi prendre en considération la proximité géographique entre les individus, comparativement aux études réalisées sur des individus anadromes ou diadromes basées sur les empreintes chimiques des otolithes (Eek et Bohlin, 1997; Secor et Rooker, 2000; Zlokovitz *et al.*, 2003; Kraus et Secor, 2004; Gillanders, 2005; Koksvik et Steinnes, 2005). Dans cette étude, la différence entre les empreintes chimiques est plus subtile.

Cette étude montre que la chimie des écailles de poisson apporte une aide importante dans la discrimination des composantes d'un stock et que cette étude est un bon point de départ pour des études futures sur le nord du golfe du Saint-Laurent. Malgré les limites de détection du système et le fait d'avoir pris en compte uniquement des éléments apparaissant comme beaucoup plus dépendant de la régulation physiologique que de l'environnement (Thresher *et al.*, 1994), l'étude présente de forts taux de classifications corrects. Les études utilisant les écailles représentent beaucoup d'avantages comparativement à celles qui se fondent sur la chimie des otolithes, matériel majoritairement utilisé pour ce genre d'étude (Campana *et al.*, 1994a et b; Volk *et al.*, 2000; Méthot *et al.*, 2005; Swan *et al.*, 2006). L'analyse peut s'effectuer sans causer la mort des individus, de plus la préparation du matériel en vue de l'analyse en SEM-ED est beaucoup plus facile que pour la préparation des otolithes (Gunn *et al.*, 1992). La simplicité de la technique et son faible coût comparatif, permet aussi d'effectuer un grand nombre d'analyses, comme c'est le cas ici.

En comparaison, l'étude se concentrant sur la chimie des vertèbres de morues (*Gadus morhua*) ne paraît pas apporter des informations utiles quant à la détermination de la structure du stock du nord du golfe du Saint-Laurent. Des études futures, basées sur les vertèbres, peuvent être envisagées en utilisant d'autres techniques de détermination de la chimie de ces structures calcifiées. Des techniques comme la spectrométrie à rayons X (Behrens Yamada *et al.*, 1987a; Mulligan *et al.*, 1983), la spectrométrie d'absorption atomique (AAS) (Gauldie et Nathan, 1977; Gauldie *et al.*, 1980) et la spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif (ICP-AES) (Brazner *et al.*, 2004), qui sont les techniques préférentiellement utilisées pour l'étude de la chimie des structures calcifiées. Il serait donc intéressant d'obtenir d'autres données à l'aide des vertèbres de morues du nord du golfe du Saint-Laurent et aussi de réaliser l'étude des corrélations entre les concentrations d'éléments chimiques appartenant à d'autres structures calcifiées de ces individus ainsi qu'avec la chimie de l'eau en vue d'obtenir une compréhension maximale de la structure du stock de morues du nord du golfe du Saint-Laurent.

Beaucoup d'études ont été effectuées sur les stocks de morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*) à l'est de Terre-Neuve et au large de la Nouvelle-Écosse pour discriminer les stocks (Ruzzante *et al.*, 1999), à l'aide de la chimie des otolithes (Campana et Gagné, 1994b; Campana *et al.*, 1997b; Campana *et al.*, 1998) et aussi à l'aide de la génétique (Bentzen *et al.*, 1996 ; Beacham *et al.*, 2002). Toutefois, on observe peu de documentation sur le stock du nord du golfe du Saint-Laurent (Minet, 1976; Templeman, 1979; Gascon *et al.*, 1990; Yvelin *et al.*, 2005). Notre étude fournit de nouvelles informations qui confirment la complexité de la population de 3Pn4RS. Il sera toutefois important d'approfondir l'étude de ce stock et ainsi d'obtenir une meilleure compréhension de sa structure. Pour ce faire, des études génétiques devraient venir en complément de l'analyse des empreintes chimiques.

CONCLUSION

Dans notre étude on a cherché à mieux appréhender la structure du stock de morue (*Gadus morhua*) du nord du golfe du Saint-Laurent (3Pn4RS) en se basant sur l'étude de la chimie des structures calcifiées des morues (écailles et vertèbres) déterminée à l'aide d'un microscope électronique muni d'un système à énergie dispersive (SEM-ED).

L'utilisation de l'analyse discriminante canonique avec un modèle composé de six éléments chimiques (Mg, Na, P, K, Cl et S) a permis de discriminer trois sous-populations au sein du nord du golfe (côte ouest de Terre-Neuve, Basse Côte-Nord, île d'Anticosti), ces sous-populations se distinguant par des empreintes chimiques différentes des écailles. Le stock du nord du golfe du Saint-Laurent ressort comme une structure complexe, avec des sous-populations discriminées par des individus passant la partie estivale dans des zones différentes. Toutes les composantes, sauf apparemment pour le cas des individus d'Anticosti, se mélangent au niveau du sud de Terre-Neuve durant l'hiver, comme il est décrit classiquement. Les analyses montrent la spécificité de la composante d'Anticosti, aussi bien en se fondant sur les écailles que sur les vertèbres. L'hypothèse d'absence de mélange de la sous-population de l'île d'Anticosti durant l'hiver en 3Pn peut s'expliquer par le fait que ces individus retournent plus tardivement en 3Pn que les autres sous-populations ou encore que cette composante possède une aire hivernale différente, ce qui pourrait laisser supposer l'existence d'un stock local. La discrimination importante des individus du sud du golfe du Saint-Laurent (4T) par rapport aux individus du nord du golfe confirme la séparation entre les deux stocks et réfute l'hypothèse d'un possible mélange entre ces stocks.

La chimie des écailles a apporté beaucoup de renseignements pour la discrimination de ce stock, ce qui n'a malheureusement pas été le cas de la chimie des vertèbres, apportant peu de réponses dans cette étude, mais appuyant tout de même la discrimination de la région d'Anticosti.

Cette étude a permis de mieux appréhender la structure du stock de morue du nord du golfe du Saint-Laurent, particulièrement en discriminant les morues de l'île d'Anticosti. En espérant que des études futures viendront soutenir nos résultats et apporter des renseignements supplémentaires sur la complexité de ce stock pour favoriser une meilleure gestion dans le futur.

RÉFÉRENCES

- Bagenal., T.B., Mackereth, F.J.H., et Heron, J., 1973.** The distinction between brown and sea trout by the strontium content of their scales. *J. Fish. Biol.*, 5: 555–557.
- Bath, G.E., Thorrold, S.R., Jones, C.M., Campana, S.E., McLaren, J.W., et Lam, J.W.H., 2000.** Strontium and barium uptake in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 64, No. 10, pp. 1705–1714.
- Beacham, T.D., Bratney, J., Miller, K.M., Le, K.D., et Withler, R.E., 2002.** Multiple stock structure of Atlantic cod (*Gadus morhua*) off Newfoundland and Labrador determined from genetic variation. –*ICES Journal of Marine Science*, 59: 650–665.
- Behrens Yamada, S., Mulligan, T.J., et Fairchild, S.J. 1979.** Strontium marking of hatchery-reared coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*, Walbaum). *J. Fish. Biol.*, 14: 267–275.
- Behrens Yamada, S., et Mulligan, T.J., 1982.** Strontium marking of hatchery reared coho salmon, *Oncorhynchus kisutch* Walbaum, identification of adults. *J. Fish Biol.*, 20: 5–9.
- Behrens Yamada, S., Mulligan, T.J., et Fournier, D., 1987a.** Role of environment and stock on the elemental composition of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) vertebrae. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol 44, pp. 1206–1212.

- Behrens Yamada, S., et Mulligan, T.J., 1987b.** Marking nonfeeding salmonid fry with dissolved strontium. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 44: 1502–1506.
- Belanger, S.E., Cherry, D.S., Ney, J.J., et Whitehurst, D.K., 1987.** Differentiation of freshwater versus saltwater striped bass by elemental scale analysis. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 116: 594–600.
- Bendell–Young, L.I., et Harvey, H.H., 1986.** Metal concentration and calcification of bone of white sucker (*Catostomus commersoni*) in relation to lake pH. *Water, air, and Soil Pollution*, 30: 657–664.
- Bentzen, P., Taggart, C.T., Ruzzante, D.E., et Cook, D., 1996.** Microsatellite polymorphism and the population structure of cod (*Gadus morhua*) in the North West Atlantic. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 53: 2706–2721.
- Bergenius, M.A.J., Mapstone, B.D., Begg, G.A., et Murchie, C.D., 2005.** The use of otolith chemistry to determine stock structure of three epinepheline serranid coral reef fishes on the Great Barrier Reef, Australia. *Fisheries Research*, 72: 253–270.
- Bérudé, M., et Fréchet, A., 2001.** Sommaire du programme de marquage des pêches sentinelles du nord du Golfe avec une emphase sur les re-captures provenant des unités de gestion voisines. *SCCS Res. Doc.* 2001/002.
- Bilton, H.T., 1975.** Factors influencing the formation of scale characters. *Int. North Pac. Fish. Comm. Bull.*, 32: 102-108.

- Bilton, H.T., et Robins, G.L., 1971.** Effects of starvation, feeding, and light period on circulus formation on scales of young sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). J. Fish. Res. Board Can., 28: 1749-1755.
- Brazner, J.C., Campana, S.E., et Tanner, D.K., 2004.** Habitat fingerprints for Lake Superior coastal wetlands derived from elemental analysis of yellow perch otoliths. Trans. Am. Fish. Soc., 133: 692–704.
- Calaprice, J.R., 1971.** X – ray spectrometric and multivariate analysis of sockey salmon (*Oncorhynchus nerka*) from different geographic regions. J. Fish. Res. Bd Can., 28: 369–377.
- Calaprice, J.R., Lapi, L.A., et Carlsen, L.J., 1975.** Stock identification using X – ray spectrometry and multivariate techniques. Bull. INPFC, Vol. 32, pp. 81–101.
- Calaprice, J.R., 1985.** Chemical variability and stock variation in northern Atlantic bluefin tuna. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT 24, 222–254.
- Campana, S.E., Fowler, A.J. et Jones, C.M., 1994a.** Otolith elemental fingerprinting for stock identification of Atlantic cod (*Gadus morhua*) using laser ablation ICPMS. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 51: 1942–1950.
- Campana, S.E., et Gagne, J.A., 1994b.** Differentiation of 4T and 4Vs cod using otolith elemental fingerprints. CAFSAC Res. Doc. 94/27.

- Campana, S.E., Gagne, J.A. et McLaren, J.W., 1995.** Elemental fingerprinting of fish otoliths using ID-ICPMS. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 122: 115–120.
- Campana, S.E., 1999.** Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series*, 188: 263–297.
- Campana, S.E., Lambert, T., Chouinard, G., Hanson, M., Frechet, A. et Brattey, J., 1998.** Stock composition of cod aggregations near the mouth of the Gulf of St. Lawrence in January 1996 based on an analysis of otolith elemental fingerprints. *CSAS Res. Doc.* 98/55.
- Campana, S.E., Lambert, T., Chouinard, G., Hanson, M., Frechet, A. et Brattey, J., 1997b.** The stock identity of 4Vn cod based on an analysis of otolith elemental fingerprints. *CSAS Res. Doc.* 97/96.
- Campana, S.E., et Thorrold, S.R., 2001.** Otoliths, increments and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 58: 30-38.
- Campana, S.E., Thorrold, S.R., Jones, C.M., Gunther, D., Tubrett, M., Longerich, H., Jackson, S., Halden, N., Kalish, J.M., Piccoli, P., De Pontual, H., Troadec, H., Panfili, J., Secor, D.H., Severin, K.P., Sie, S.H., Thresher, R., Teesdale, W.J. et Campbell, J.L., 1997.** Comparison of accuracy, precision and sensitivity in elemental

assays of fish otoliths using the electron microprobe, proton-induced X-ray emission, and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 54:2068-2079.

Campana, S.E., Valentin, A., Sévigny, J.M., et Power, D., 2007. Tracking seasonal migrations of redbait (Sebastes spp.) in and around the Gulf of St. Lawrence using otolith elemental fingerprints. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 64: 6-18.

Carlander, K.D., 1987. A history of scale age and growth studies of North American freshwater fish. In *The age and growth of fish*. (Summerfelt, R.C. & Hall, G.E., ed.), pp. 3–14. Ames, Iowa, USA: The Iowa State University Press.

Carlström, D., 1963. A crystallographic study of vertebrate otoliths. *Biological Bulletin.*, 124: 441–463.

Cohen, D.M., Inada, T., Iwamoto, T., et Scialabba, N., 1990. Gadiform fishes of the world (order Gadiformes). *FAO Species Catalogues, FAO Fisheries Synopsis*, 10(125), 442p.

Courtemanche, D. A., Whoriskey Jr., F. G., Bujold, V., et Curry, R. A., 2005. A nonlethal approach using strontium in scales to distinguish periods of marine and freshwater residency of anadromous species. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 62:2443-2449.

Courtemanche, D. A., Whoriskey Jr., F. G., Bujold, V., et Curry, R. A., 2006. Assessing anadromy of brook char (*Salvelinus fontinalis*) using scale microchemistry. *Can. J. Fish.*

Aquat. Sci., 63:995-1006.

Coutant, C.C., et Chen, C.H., 1993. Strontium microstructure in scales freshwater and estuarine striped bass (*Morone saxatilis*) detected by laser ablation mass spectrometry. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 50: 1318–1323.

Degens, E.T., Deuser, W.G., et Haedrich, R.L., 1969. Molecular structure and composition of fish otoliths. *Mar. Biol.*, 2: 105–113.

De Pontual, H., Lagardère, F., Amara, R., Bohn, M., et Ogor, A., 2003. Influence of ontogenic and environmental changes in the otolith microchemistry of juvenile sole (*Solea solea*). *Journal of Sea Research*, 50: 199–210.

De Vries, M.C., Gillanders, B.M., et Elsdon, T.S., 2005. Facilitation of barium uptake into fish otoliths: Influence of strontium concentration and salinity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69, pp. 4061–4072.

EEK, D., et Bohlin, T., 1997. Strontium in scales verifies that sympatric sea-run and stream-resident brown trout can be distinguished by coloration. *Journal of Fish Biology*, 51: 659–661.

Elsdon, T.S. et Gillanders, B.M., 2006. Temporal variability in strontium, calcium, barium, and manganese in estuaries: Implications for reconstructing environmental histories of fish from chemicals in calcified structures. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66: 147–156.

- Fisheries Agency of Japan, 1967.** Study on identification of the Pacific salmon by neutron activation analysis. Survey and Research Divisions, Fisheries Agency of Japan.
- Frank, K.T., et Brickman, D., 2000.** Allee effects and compensatory population dynamics within a stock complex. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 57: 513–517.
- Fréchet, A., 1990.** Catchability variations of cod in the marginal ice zone. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47: 1678–1683.
- Fouda, M.M., 1979.** Studies on scale structure in the common goby *Pomatoschistus microps* Kroyer. *J. Fish. Biol.*, 15: 173-183.
- Fuentes Yacco, C. 1996.** Télédétection de la biomasse phytoplanctonique dans le golfe du Saint-Laurent, Canada : analyse des données du capteur « coastal zone color scanner », de 1979 à 1981. Thèse Ph.D. Université du Québec à Rimouski, 176 p.
- Gascon, D., Aparicio, M., et Mercille, B., 1990.** Estimations du mélange entre les stocks de morue du Nord du Golfe du Saint-Laurent (divisions 3Pn4RS) et les stocks adjacents (2J3KL, 3Ps, et 4TVn [Janvier–Avril]) à partir des résultats de marquage. CSCPCA Doc. Rech 90/61, 25p.
- Gascon, D., Castonguay, M., Fréchet, A., et Bourassa, L., 1997.** Homing in Cod (*Gadus morhua* L.): Tagging in the Gulf of St. Lawrence 1983–1996. CSAS Report.

- Gauldie, R.W., et Nathan, A., 1977.** Iron content of the otoliths of tarakihi (Teleostei : Cheilodactylidae). *N. Z. J. Mar. Freshwat. Res.*, 11: 179–191.
- Gauldie, R.W., Graynoth, E.J., et Illingworth, J., 1980.** The relationship of the iron content of some fish otoliths to temperature. *Comp. Biochem. Physiol. A*, 66: 19–24.
- Gauldie, R.W., Fournier, D.A., et Coote, G., 1986.** Atomic emission and proton microprobe studies of the ion content of otoliths of Chinook salmon aimed at recovering the temperature life history of individuals. *Comp. Biochem. Physiol. A*, 84: 607–615.
- Gerdeaux, D. et Perga, M.-E., 2006.** Changes in whitefish scales $\delta^{13}\text{C}$ during eutrophication and reoligotrophication of subalpine lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 51:772-780.
- Gillanders, B.M., 2001.** Trace metals in four structures of fish and their use for estimates of stock structure. *Fish. Bull.*, 99: 410–419.
- Gillanders, B.M., 2005.** Using elemental chemistry of fish otoliths to determine connectivity between estuarine and coastal habitats. *Estuarine, Coastal and Sciences*, 64: 47–57.
- Gillanders, B.M., et Kingsford, M.J., 1996.** Elements in otoliths may elucidate the contribution of estuarine recruitment to sustaining coastal reef populations of a temperate reef fish. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 141: 13-20.
- Gunn, J.S., Harrowfield, I.R., Proctor, C.H., et Tresher, R.E., 1992.** Electron probe microanalysis of fish otoliths – evaluation of techniques for studying age and stock discrimination. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 158: 1–36.

- Halden, N.M, Babaluk, J.A., Campbell, J.L., et Teesdale, W.J., 1995.** Scanning proton microprobe analysis of strontium in an arctic charr, *Salvelinus alpinus*, otolith: implications for the interpretation of anadromy. *Environ. Biol. Fish.*, 43: 333–339.
- Hederström, H., 1759.** Rön an Fiskars Älder. 222–229. Dans Manuel de sclérochronologie des poissons. Plouzané, France : IFREMER ; Paris : Institut de recherche pour le développement, 2002. 463 p. ill.
- Hutchinson, J. J. et Trueman, C. N., 2006.** Stable isotope analyses of collagen in fish scales: limitations set by scale architecture. *J. Fish Biol.*, 69:1874-1880.
- Johnson, M.G., 1989.** Metals in fish scales collected in lake Opeongo, Canada, from 1939 to 1979. *Transactions of the American Fisheries Society*, 118: 331–335.
- Jónsdóttir, I.G., Campana, S. E., et Marteinsdóttir, G., 2006.** Stock structure of Icelandic cod *Gadus morhua* L. based on otolith chemistry. *Journal of Fish Biology*, 69 (supplement C): 136–150.
- Kalish, J.M., 1989.** Otolith microchemistry: validation of the effects of physiology, age and environment on otolith composition. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 132: 151–178.
- Kennedy, B.P., Blum, J.D., Folt, C.L., et Nislow, K.H., 2000.** Using natural strontium isotopic signatures as fish markers: methodology and application. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 57: 2280–2292.

Kennedy, B. P., Chamberlain, C. P., Blum, J. D., Nislow, K. H., et Folt, C. L., 2005.

Comparing naturally occurring stable isotopes of nitrogen, carbon, and strontium as markers for the rearing locations of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Can. J. Fish. Aquat. Sci., 62:48-57.

Koksvik, J.I., et Steinnes, E., 2005. Strontium content of scales as a marker for

distinguishing between sea trout and brown trout. Hydrobiologia, 544: 51–54.

Koutitonsky, V.G., et Bugden, G.L., 1991. The physical oceanography of the Gulf of

St.Lawrence: a review with emphasis on the synoptic variability of the motion, p. 57–90. In J.–C. Therriault [éd.] The Gulf of St.Lawrence: small ocean or big estuary? Can. Spec. Publ. Fosh. Aquat. Sci. 113.

Kraus, R.T. et Secor, D.H., 2004. Incorporation of strontium into otoliths of an estuarine

fish. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 302: 85–106.

Lapi, L.A. et Mulligan, T.J., 1981. Salmon stock identification using a microanalytic

technique to measure elements present in freshwater growth regions of scales. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 38: 744–751.

Lear, W.H., 1988. Migrations of Atlantic cod of NAFO Division 3Ps. NAFO Scr Doc. No.

73. Serial No. N1516, 8p.

- MacNeil, M.A., et Campana, S.E., 2003.** Comparison of whole and sectioned vertebrae for determining the age of young blue shark (*Prionace glauca*). *J. Northw. Atl. Fish. Sci.*, 30:77–82.
- McGuinness, K.A., 2002.** Of rowing boats, ocean liners and tests of the ANOVA homogeneity of variance assumption. *Austral. Ecol.*, 27:681–688.
- Méthot, R., Castonguay, M., Lambert, M., Audet, C. et Campana, S., 2005.** Spatio-temporal distribution of spawning and stock mixing of Atlantic cod from the Northern Gulf of St. Lawrence and Southern Newfoundland stocks on Burgeo Bank as revealed by maturity and trace elements of otoliths. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.*, 36: 1–12.
- Minet, J.P., 1976.** Migration of cod between the northern Gulf of St. Lawrence and the southwestern banks of Newfoundland. *ICNAF Res. Doc.* 76/VI/74.
- Moreau, G., et Barbeau, C., 1979.** Différenciation de populations anadromes et dulcicoles de Grands Corégones (*Coregonus clupeaformis*) par la composition minérale de leurs écailles. *J. Fish. Res. Board. Can.*, 36: 1439–1444.
- Muhlfeld, C. C., Marotz, B., Thorrold, S. R., et FitzGerald, J. L., 2005.** Geochemical signatures in scales record stream of origin in westslope cutthroat trout. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 134:945-959.

- Mulligan, T.J., Lapi, L., Kieser, R., Yamada, S.B., et Duewer, D.L., 1983.** Salmon stock identification based on elemental composition of vertebrae. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40: 215–229.
- Mulligan, T.J., Martin, F.D., Smucker, R.A., et Wright, D.A., 1987.** A method of stock identification based on the elemental composition of striped bass *Morone saxatilis* (Walbaum) otoliths. *J. exp. Mar. Biol. Ecol.*, 114: 241–248.
- Myers, R.A., Hutchings, J.A. et Barrowman, N.J., 1996.** Hypotheses for the decline of cod in the North Atlantic. *Marine Ecology Progress Series*, 138: 293–308.
- Myers, R.A., Mertz, G., et Fowlow, P.S., 1997a.** Maximum population growth rates and recovery times for Atlantic cod, *Gadus morhua*. *Fish. Bull.*, 95: 762–772.
- Myers, R.A., Hutchings, J.A. et Barrowman, N.J., 1997b.** Why do fish stocks collapse? The example of cod in Atlantique Canada. *Ecol. Appl.*, 7: 91–106.
- Natanson, L.J., Mello, J.J., et Campana, S.E., 2002.** Validated age and growth of the porbeagle shark, *Lamna nasus*, in the western North Atlantic Ocean. *Fish. Bull., U.S.*, 100: 266–278.
- Ouellet, P., Lambert, Y., et Castonguay, M., 1997.** Spawning of Atlantic cod (*Gadus morhua*) in the northern Gulf of St. Lawrence: a study of adult and egg distributions and characteristics. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 54: 198–210.

- Papadopoulou, C., Kanias, G. D. et Moraitopoulou–Kassimati, E., 1978.** Zinc content in otoliths of mackerel from the Aegean. *Mar. Poll. Bull.*, Vol.9, pp. 106–108.
- Papadopoulou, C., Kanias, G. D. et Moraitopoulou–Kassimati, E., 1980.** Trace element content in fish otoliths in relation to age and size. *Mar. Poll. Bull.*, Vol. 11, pp68–72.
- Pender, P. J., et Griffin, R. K., 1996.** Habitat history of barramundi *Lates calcarifer* in a North Australian river system based on barium and strontium levels in scales. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 125: 679–689.
- Perga, M.E., et Gerdeaux, D., 2003.** Using the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of whitefish scales for retrospective ecological studies: changes in isotope signatures during the restoration of Lake Geneva, 1980-2001. *The Fisheries Society of the British Isles*, 63: 1197-1207.
- Petursdottir, G., Begg, G. A., et Marteinsdottir, G., 2006.** Discrimination between Icelandic cod (*Gadus morhua* L.) populations from adjacent spawning areas based on otolith growth shape. *Fisheries Research*, 80: 182–189.
- Pollard, M.J., Kingsford, M.J., et Battaglione, S.C., 1999.** Chemical marking of juvenile snapper, *Pargus auratus* (Sparidae), by incorporation of strontium into dorsal spine. *Fish. Bull.*, 97: 118-131.
- Radtke, R.L., 1987.** Age and growth information available from the otoliths of the Hawaiian snapper, *Pristipomoides filamentosus*. *Coral Reefs*, Vol. 6, pp. 19–25.

- Radtke, R.L., Townsend, D.W., Folsom, S.D., et Morrison, M.A., 1990.** strontium : calcium concentration ratios in otoliths of herring larvae as indicators of environmental histories. *Environ. Biol. Fishes*, 27: 51–61.
- Ruzzante, D.E., Taggart, C.T. et Cook, D., 1999.** A review of the evidence for genetic structure of cod (*Gadus morhua*) populations in the Northwest Atlantic and population affinities of larval cod off Newfoundland and the Gulf of St Lawrence. *Fisheries Research*, 43: 79–97.
- Sauer, G.R., et Watabe, N., 1989.** Temporal and metal–specific patterns in the accumulation of heavy metals by the scales of *Fundulus heteroclitus*. *Aquatic toxicology*, 14: 233–248.
- Secor, D.H., 1992.** application of otolith microchemistry analysis to investigate anadromy in Chesapeake Bay striped bass *Morone saxatilis*. *Fish. Bull., US.*, 90: 798–806.
- Secor, D.H., Henderson–Arzapalo, A., et Piccoli, P. M., 1995.** Can otolith microchemistry chart patterns of migration and habitat utilization in anadromous fishes? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 192: 15–33.
- Secor, D.H. et Rooker, J.R., 2000.** Is otolith strontium a useful scalar of life cycles in estuarine fishes? *Fisheries Research*, 46: 359–371.
- Smedbol, R.K., et Wroblewski, J.S. 2002.** Metapopulation theory and northern cod population structure: interdependency of subpopulations in recovery of a groundfish population. *Fish. Res.*, 55: 161–174.

Smedbol, R. K., Shelton, P. A., Swain, D. P., Frechet, A. et Chouinard, G. A., 2002.

Survól de la structure de la population, de la distribution et de l'abondance de la morue (*Gadus morhua*) dans le Canada atlantique dans le contexte des espèces en péril. SCCS Doc. Rech 02/82, 134p.

Stephenson, R.L., 1997. Successes and failures in the management of Atlantic herring

fisheries: Do we know why some have collapsed and others survived? In: Hancock, D.A., Smith, D.C., Grant, A., Buemer, J.P. (Eds.), *Developing and Sustaining World Fisheries Resources: The State of Science and Management*, Proceedings of the Second World Fisheries Congress.

Stephenson, R.L., 1998. Consideration of localized stocks in management: a case statement

and a case study. In: Hunt von Herbing, I., Kornfield, I., Tupper, M., Wilson, J. (Eds.), *The Implication of Localized Fisheries Stocks*, Proceedings of the Workshop on Localized Stocks, Portland, ME, 31 October–1 November 1997, NRAES 5Natural Ressource, Agriculture and Engineering Service), Ithaca, NY, pp. 160–168.

Stephenson, R.L., 1999. Stock complexity in fisheries management: a perspective of

emerging issues related to population sub-units. *Fish. Res.*, 43: 247–249.

Swan, S.C., Geffen, A.J., Morales–Nin, B, Gordon, J.D.M., Shimmield, T., Sawyer, T., et

Massuti, E., 2006. Otolith chemistry : an aid to stock separation of *Helicolenus dactylopterus* (bluemouth) and *Merluccius merluccius* (European hake) in the

Northeast Atlantic and Mediterranean. – ICES Journal of Marine Science, 63: 504–513.

Templeman, W., 1962. Divisions of cod stocks in the Northwest Atlantic. In ICNAF, Redbook 1962, Part III, Selected papers from the 1962 Annual Meetings, pp. 79–123.

Templeman, W., 1974. Migrations and intermingling of Atlantic cod (*Gadus morhua*) stocks of Newfoundland area. J. Fish. Res. Bd. Canada., 31: 1073–1092.

Templeman, W., 1979. Migration and Intermingling of Stocks of Atlantic Cod, *Gadus morhua*, of the Newfoundland and Adjacent Areas from Tagging in 1962–1966. ICNAF Res. Bull., 14: 5–50.

Thresher, R.E., Proctor, C.H., Gunn, J.S., et Harrowfield, I.R., 1994. An evaluation of electron–probe microanalysis of otoliths for stock delineation and identification of nursery areas in a southern temperate groundfish, *Nemadactylus macropterus* (Cheilodactylidae). Fisheries Bulletin, 92: 817–840.

Thresher, R.E. 1999. Elemental composition of otoliths as a stock delineator in fishes. Fisheries Research, 43: 165–204.

Vas, P., Stevens, J.D., Bonwick, G.A., et Tizini, O.A., 1990. Cd, Mn, and Zn concentrations in vertebrae of blue shark and shortfin mako in Australian coastal waters. Mar. Poll. Bull., 21: 203–206.

Volk, E.C, Blakley, A., Schroder, S.L., et Kuehner, S.M., 2000. Otolith chemistry reflects migratory characteristics of Pacific salmonids: Using otolith core chemistry to

distinguish maternal associations with sea and freshwaters. *Fisheries Research* 46: 251–266.

Wainright, S. C., M.J. Fogarty, R.C. Greenfield, et B. Fry., 1993. Long-term changes in the Georges Bank food web: trends in stable isotopic compositions on fish scales. *Mar. Biol.*, 115:481-493.

Wells, B.K., bath, G. E., Thorrold, S. R., et Jones, C. M., 2000a. Incorporation of strontium, cadmium, and barium in juvenile spot (*Leiostomus xanthurus*) scales reflects water chemistry. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 57: 2122–2129.

Wells, B.K., Thorrold, S.R. et Jones, C.M., 2000b. Geographic variation in trace element composition of juvenile weakfish scales. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129: 889–900.

Wells, B. K., Thorrold, S. R., et Jones, C. M., 2003. Stability of elemental signatures in the scales of spawning weakfish, *Cynoscion regalis*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 60:361-369.

Wells, B.K., Rieman, B. E., Clayton, J.L., Horan, D.L., et Jones, C.M., 2003. Relationships between water, otolith, and scale chemistries of westslope cutthroat trout from the Coeur d'Alene River, Idaho: the potential application of hard-part chemistry to describe movements in fresh water. *Trans. Am. Fish. Soc.* 132: 409–424.

Winer, B.J., Brown, D.R. et Michels, K.M., 1991. Statistical principles in experimental design. McGraw–Hill, NY, 1057 pp.

Yvelin, J.F., Fréchet, A., et Brêthes, J.C., 2005. Parcours migratoires et structure du stock de la morue du nord du golfe du Saint-Laurent (3Pn, 4RS). SCCS Doc. Rech 05/55, 50p.

Zlokovitz, E.R, Secor, D.H., et Piccoli, P.M., 2003. Patterns of migration in Hudson River striped bass as determined by otolith microchemistry. Fisheries Research, 63: 245–259.